

Návrh a realizace modulární IQRF komunikační brány s ohledem na nízkou spotřebu elektrické energie

Design and Implementation of Modular IQRF Communication Gateway with
Regard to Low Power Consumption

Bc. Jakub Klokočník

Diplomová práce

Vedoucí práce: Ing. Martin Pieš, Ph.D.

Ostrava, 2021

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a realizací prototypu komunikační brány, který je v co největší míře koncipován modulárně. K návrhu bylo přistupováno tak, aby výsledné zařízení bylo co nejvíce energeticky úsporné, a to jak z hardwarového, tak i softwarového hlediska. Navržená komunikační brána umožňuje sběr dat z IQMESH sítě a následně lze tyto data pomocí LTE nebo ethernetu poslat do cloudu. Základní funkcionality brány je dána firmwarem, ale díky LoRa technologii lze bránu kdykoliv bezdrátově nastavovat a hlásit její provozní stav. Výsledná DPS je navržena jako vývojová deska a lze ji jednoduše vybavit např. WiFi technologií. Jako zdroj elektrické energie byla použita baterie a o její stav a nabíjení se stará navržený modul dobíječe, který obsahuje kompletní management baterie. K dobíjení baterie lze použít jakýkoliv stejnosměrný zdroj a jelikož má obvod dobíječe implementovanu MPPT technologii, lze baterii dobíjet i za pomoci solárního panelu.

Klíčová slova

IoT technologie; IQRF; LoRa; LTE; UART; SPI; I²C; NanoPi; C; mikrokontrolér; Hardwario; MPPT

Abstract

This master thesis deal with a design and implementation of gateway prototype, which is largery modular. The design was approached so that the resulting device was energy efficient, both in terms of hardware and software. The designed communication gateway enables data collection from the IQMESH network and then allows this data to be sent to the cloud via LTE or Ethernet. The basic functionality of the gateway is determined by the firmware, but LoRa technology allows update gateway wirelessly at any time and report gateway status. The final PCB is designed as a development board and can be gradually equipped with eg WiFi technology. The battery was used as a source of electric power and condition and charging provides designed charger module, which contains a complete battery management system. You can use any DC source and also solar panel to charge the battery, because charger circuit implements MPPT.

Keywords

IoT technology; IQRF; LoRa; LTE; UART; SPI; I²C; NanoPi; C; microcontroller; Hardwario; MPPT

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval vedoucímu práce Ing. Martinu Piešovi, Ph.D. za vedení, konzultace a cenné rady, které vedly ke zdárnému dokončení této práce. Věřím, že tyto předané zkušenosti a rady budou pro mne přínosem i v technické praxi. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Janu Veličkovi a Ing. Radovanovi Hájovskému, Ph.D. za cenné rady a připomínky při návrhu a oživení komunikační brány.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratek	6
Seznam obrázků	8
Seznam tabulek	10
1 Úvod	11
2 IoT Technologie	13
2.1 LoRa	15
2.2 Sigfox	19
2.3 NarrowBand	24
2.4 IQRF	27
3 Návrh a realizace HW	30
3.1 Modul dobíječe	31
3.2 Modul zdroje napájení	47
3.3 Řídicí modul	49
3.4 LoRa Modul	51
3.5 Výpočetní modul	52
3.6 IQRF modul	53
3.7 LTE modul	55
3.8 Základní deska	56
4 Návrh a realizace firmwaru řídicího modulu	60
4.1 Princip fungování firmwaru	61
4.2 Komunikace s monitorovacím obvodem	62
4.3 Komunikace s LoRa modulem	68
4.4 Komunikace s výpočetním modulem	72

5	Analýza energetické náročnosti	74
5.1	Měření spotřeby bez komunikace	75
5.2	Měření spotřeby s komunikací	77
5.3	Teoretická výdrž baterie baterie	78
6	Návrhy na zlepšení	81
7	Závěr	84
	Literatura	86
	Přílohy	88
A	Seznam příloh	89

Seznam použitých zkratek a symbolů

ABP	– Activation-By-Personalization
AES	– Advanced-Encryption-Standard
API	– Application Programming Interface
APPEUI	– 64-bitový identifikátor aplikace
APPKEY	– 128-bitový aplikační klíč, slouží k autentizaci zařízení v síti a odvozuje se od něho další klíče
BLE	– Bluetooth Low Energy
ČRA	– České radiokomunikace
DBPSK	– Differential binary phase shift keying
DEVEUI	– 64-bitový identifikátor zařízení, přiřazen výrobcem zařízení
DPS	– Deska plošných spojů
DSSS	– Direct Sequence Spread Spectrum
EMC	– Electro Magnetic Compatibility
ESD	– ElectroStatic Discharge
FDMA	– Frequency Division Multiple Access
FHSS	– Frequency Hopping Spread Spectrum
FRAM	– Ferroelectric RAM
GMSK	– Gaussian Minimum-Shift Keying
GPIO	– General Purpose Input Output
GSM	– Groupe Spécial Mobile
HMI	– Human machine interface
HW	– Hardware
I ² C	– Internal-Integrated-Circuit Bus
IC	– Integrated Circuit
IoT	– Internet of Things
IP	– Internet Protocol
LAN	– Local Area Network
LED	– Light-Emitting Diode

LiFePO ₄	– Lithium-železo-fosfátový akumulátor
Li-Ion	– Lithium-Iontový akumulátor
LiPo	– Lithium-Polymerový akumulátor
LoRa	– Long Range
LoRaWAN	– Long Range Wolrd Area Network
LSB	– Least Significant Bit
LTE	– Long Term Evolution
MAC	– Media Access Control
MOSFET	– Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
MPPT	– Maximum Power Point Tracking
MSB	– Most Significant Bit
NB-IoT	– Narrow Band - Internet of Things
NFC	– Near Field Communication
OFDM	– Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OS	– Operating System
OSI	– Open Systems Interconnection
OTAA	– Over The Air Activation
PCB	– Printed Circuit Board
POR	– Power Over Reset
RAM	– Random Access Memory
RF	– Radio frequency
RTC	– Real Time Clock
SC-FDMA	– Single-Carrier-Frequency-Division Multiple Access
SCL	– Serial Clock
SDA	– Serial Data
SDK	– Software Development Kit
SIM	– subscriber identity module
SMD	– Surface Mount Device
SMS	– Short message service
SPI	– Serial Peripheral Interface
SRAM	– Static Random Access Memory
SSD	– Solid-State Drive
SW	– Software
TCP/IP	– Transmission Control Protocol/Internet Protocol
UART	– Universal Asynchronous Receiver and Transmitter
USB	– Universal Serial Bus
WCDMA	– Wideband Code Division Multiple Access
WiFi	– Wireless Fidelity

Seznam obrázků

2.1	Pokrytí LoRaWAN signálem [1]	16
2.2	Architektura LoRa sítě [3]	17
2.3	LoRaWAN protokol [6]	18
2.4	Pokrytí Sigfox signálem [1]	20
2.5	Architektura Sigfox sítě [8]	21
2.6	Sigfox přenosový OSI model [8]	23
2.7	Struktura Sigfox rámce [8]	23
2.8	Architektura sítě NB-IoT [3]	25
2.9	Mapa pokrytí sítí NB-IoT [3]	26
2.10	Možnosti nasazení NB-IoT [9]	27
3.1	Blokové schéma modulu dobíječe	32
3.2	Osazená DPS modulu dobíječe	32
3.3	Schéma algoritmu detekce baterie	36
3.4	Schéma algoritmu dobíjecího obvodu	38
3.5	Vybíjecí charakteristika LiFePO ₄ baterie [16]	39
3.6	Zapojení modulu dobíječe pro otestování funkčnosti	46
3.7	Modul zdroje	48
3.8	Hardwario Core modul	50
3.9	Hardwario LoRa modul	51
3.10	Výpočetní modul	53
3.11	Zvolený IQRf modul[11]	54
3.12	LTE mPCIe modul BG96MA	55
3.13	Blokové schéma komunikační brány	57
3.14	Přední strana DPS komunikační brány	58
3.15	Zadní strana DPS komunikační brány	59
4.1	Zjednodušený vývojový diagram firmwaru, zobrazení smyček	61
4.2	Vývojový diagram inicializační funkce monitorovacího obvodu	66

4.3	Vývojový diagram funkce pro čtení stavu baterie	67
4.4	Zjednodušený vývojový diagram LoRa handleru	69
4.5	Seznam dostupných bran	72
4.6	Seznam dostupných bran včetně nově připojené	73
5.1	Měření spotřeby na měřicím pracovišti	75
5.2	Průběh proudového odběru při provozním stavu bez LTE komunikace	76
5.3	Průběh proudového odběru při LoRa vysílání	77
5.4	Průběh proudového odběru při provozním stavu s LTE komunikací	77
6.1	Blokové schéma budoucího prototypu	82

Seznam tabulek

2.1	Srovnání některých IoT technologií [2]	14
2.2	Parametry modulace pro jednotlivé datové rychlosti[6]	18
3.1	Doporučené hodnoty LC filtrů pro různé nabíjecí proudy	37
3.2	Definice status pinů	37
3.3	Rozlišení jednotlivých druhů registrů	44
3.4	Volba snímacího odporu v závislosti na kapacitě baterie a dobíjecím proudem	44
3.5	Srovnání základních parametrů různých druhů IQRF modulů[11]	54
4.1	Formát VEmpty registru - část VE	63
4.2	Formát VEmpty registru - část VR	63
4.3	Hodnota VEmpty registru	64
4.4	Formát horního bytu ModelCfg registru	64
4.5	Formát spodního bytu ModelCfg registru	64
4.6	Hodnota pro zapsání do ModelCfg registru	64
4.7	Struktura zprávy z komunikační brány	70
4.8	Struktura zprávy z LoRy	71
4.9	Typy příkazů	71
5.1	Průměrné hodnoty proudových odběrů - provozní stav komunikační brány bez LTE komunikace	76
5.2	Průměrné hodnoty proudových odběrů - provozní stav komunikační brány s LTE komunikací	78

Kapitola 1

Úvod

V dnešní moderní době se stále častěji setkáváme s IoT technologiemi všude kolem nás a to nejen v oblasti průmyslu, ale i v zařízeních vlastní potřeby. Důvodem vzniku bylo propojení různých zařízení a senzorů mezi sebou s následným předáváním dat v rámci určité komunikační sítě. Nejčastěji se s nimi můžeme setkat u měřicích nebo monitorovacích systémů. Spojení měřicího systému s IoT technologií je velice výhodné, protože byly navrženy s ohledem na co nejnižší spotřebu elektrické energie a díky nim lze napájet měřicí systém pomocí baterie po dobu několika let bez nutnosti zásahu, což je žádoucí u těžce přístupných míst. S nástupem relativně nového trendu tzv. Průmyslu 4.0 lze očekávat markantní nárůst takovýchto systémů s IoT technologiemi. Každá IoT technologie má svou vlastní komunikační síť nebo umožňuje tuto síť vytvořit pomocí komunikačních modulů, jako je tomu u IQRF modulů od české firmy Microrisc, s.r.o. Cílem této diplomové práce je navrhnout a zrealizovat modulární IQRF komunikační bránu s ohledem na co nejnižší možnou spotřebu elektrické energie. Tato brána sdružuje měřicí uzly s technologií IQRF v rámci MESH sítě a zároveň naměřená data posílá do cloudu v rámci určité komunikační sítě. Součástí komunikační brány je i bateriový dobíječ, který je schopen tuto bránu dobíjet pomocí solárního panelu, popř. tuto bránu napájet z externího zdroje napětí. Velkou výhodou návrhu je možnost výměny komunikačních modulů za jiný bez zásahu do desky plošných spojů a možnost dobíjení solárním panelem, což zaručuje bezzásahový provoz několika let.

Práce je rozdělena do dvou hlavních částí. První část je teoretická a zabývá se především popisem nejznámějších IoT technologií včetně parametrů komunikace, popisu sítě a pokrytí signálem. Druhá část je praktická a týká se návrhu a realizace výsledné komunikační brány.

V praktické části jsou v jednotlivých kapitolách popsány dílčí komponenty. Pro lepší představu jsou zde uvedeny zjednodušená bloková schémata, která zobrazují základní vztahy a propojení mezi jednotlivými moduly. První část je věnována hardwaru, kde je nejprve popsán každý navržený modul, a poté jsou zde stručně popsány použité integrované obvody, které byly pro realizaci modulů využity. Použité moduly, které nebyly v rámci této práce navrženy, jsou stručně popsány v dalších podkapitolách. V další kapitole je popsáno oživení komunikační brány a uvedení do základního

funkčního režimu. Nejprve je popsán princip fungování firmwaru z hlediska provozního stavu, a poté dílčí fragmenty kódu. Předposlední kapitola je věnována analýze energetické náročnosti, kde došlo k měření a porovnání provozního stavu s LTE komunikací a bez ní. Rovněž jsou zde uvedeny příklady teoretické výdrže baterie při normálním provozním stavu s LTE komunikací. V poslední kapitole jsou uvedeny návrhy na zlepšení, z nichž některé vybrané jsou zahrnuty v návrhu druhého prototypu vyvíjeného v rámci projektu MPO FV40132 – „Vývoj autonomního ostrovního systému pro obousměrnou komunikaci s bezdrátovými uzly sítě“ řešeného na katedře kybernetiky a biomedicínského inženýrství, který vylepšuje první prototyp popisovaný v této práci.

Kapitola 2

IoT Technologie

Internet věcí (Internet of Things) se za poslední roky stává čím dál více populárnější a označuje tak síť fyzických zařízení, která jsou vybavena elektronikou, softwarem, senzory, síťovou konektivitou a která umožňuje těmto zařízením vzájemnou komunikaci a výměnu dat nejčastěji za pomoci bezdrátové sítě. Díky těmto technologiím je možné vzájemné propojení různých zařízení jako jsou domácí spotřebiče, měřicí systémy, automobily apod. IoT umožňuje zjišťování a vzdálenou kontrolu pomocí existující sítě (mobilní, počítačová, internet), čímž je zajištěna jednodušší integrace zařízení do počítačově řízených systémů, která zahrnuje např. chytré domácnosti, chytrá města a inteligentní dopravu. Samozřejmě platí, že se IoT zařízení nepřipojují ke stejnému „internetu“ jako naše mobilní telefony či notebooky, protože vyžadují speciální zacházení, které klasické sítě nenabízí. Tou je hlavně vzdálenost na kterou mohou zařízení komunikovat a energetická náročnost, která je obzvlášť důležitá, protože u těchto zařízení se počítá s minimální výdrží několika let. Spotřeba elektrické energie je samozřejmě závislá na množství posílaných zpráv, frekvenci měření a spotřebě senzorů. Za účelem zvýšení výdrže baterie se takovéto uzly vybavují solární panelem, který zajišťuje potřebnou elektrickou energii k dobití baterií, aby byla výdrž zařízení co největší.

Zařízení si posílají a přijímají data prostřednictvím IoT sítě, které umí levně a relativně rychle přenést data z bodu A do bodu B a zase zpět. Tohle by ovšem nefungovalo, pokud by telekomunikační společnosti pracně nevybudovaly infrastrukturu, kterou dnes známe. Proto není divu, že se do výstavby takové infrastruktury pouští hlavně takové společnosti, které mají s takovým budováním mnohaleté zkušenosti. Využitím IoT technologií lze propojit mnoho zařízení, získat velké množství dat a propojit je s internetem za účelem dalšího zpracování, analýzy, archivace a vizualizace dat.

Mezi nejznámější bezdrátové IoT technologie patří Lora, Sigfox, NB-IoT, IQRF, Bluetooth Low Energy (BLE), Zigbee a další. Každá z těchto technologií funguje na jiném principu komunikace. Některé využívají již vytvořené komunikační sítě, u jiných je potřeba síť vytvořit za pomoci speciálních vysílacích modulů. Na území České republiky můžeme využít např. technologii Lora, kterou zastřešují České Radiokomunikace, Sigfox (SimpleCell) nebo NB-IoT (prozatím pouze Vodafone) a u kterých není nutné vytvářet komunikační síť díky mobilním operátorům. Technologie

IQRF nevyužívá žádnou komerčně dostupnou síť, ale je nutné si ji vytvořit pomocí komunikačních modulů. Každá IoT technologie má své výhody a nevýhody a je vhodné si předem ujasnit, která technologie bude pro danou aplikaci nejvhodnější. Využitím technologií využívající komerčně dostupné sítě je jednodušší z hlediska tvorby sítě, kterou není potřeba vytvářet a zároveň většina těchto sítí je dostupná po celém území ČR. Tudíž odpadá nákladné nasazení, ale je nutné platit poplatky poskytovateli. Vytvoření vlastní sítě vede na flexibilnější řešení, ale z počátku dražší, protože je nutné zakoupit vysílací moduly a vytvořit bezpečnou síť. Výhodou je „bezplatný“ provoz.[1]

IoT technologie jsou čím dál více využívány jak v průmyslovém odvětví, tak i v běžném životě. Pomocí těchto technologií můžeme snadno a efektivně monitorovat pohyby konstrukcí, sesuvy půdy, povětrnostní podmínky, alarmy v domovech, rozsvícená světla v domě, zaplavení atd. Důležité je vybrat vhodnou technologii pro určitou aplikaci a nepoužívat např. Wi-Fi (vysoká spotřeba el. energie, vysoký datový tok) pro detektor kouře, jelikož by se baterie rychle vybila a u detekce kouře je zcela dostačující posílání několika zpráv za minutu. U kamerového systému pro ochranu svého majetku se pravděpodobně Wi-Fi nevyhneme, protože potřebujeme vysoký datový tok pro streaming videa. V následující tabulce je porovnání některých IoT technologií, které může ulehčit výběr technologie pro danou aplikaci.

Tabulka 2.1: Srovnání některých IoT technologií [2]

	Krátký dosah		Dlouhý dosah		
	WiFi	BLE	GSM/3G/4G	Lora	Sigfox
Max. dosah signálu	50 m	150 m	35 km (u HSPA 200 km)	15 km (civilizace 2-5 km)	50 km (civilizace 3-10 km)
Max. počet zapojených zařízení	dle výrobce	200	tisíce	tisíce	tisíce
Max. velikost zprávy	2 kB	27 bajtů	N/A	250 bajtů	12 bajtů (+limit zpráv)
Přenosová rychlost	typ. 150- 200 Mbit/s	1 Mbit/s	10 Mbit/s (u 4G)	50 kbit/s	100 bit/s
Spotřeba energie	vysoká	střední	vysoká	nízká	nízká
Použití	bezpečnostní kamery	termostaty	alarmy	detektory kouře, teploty, vlhkosti, zaplavení,...	

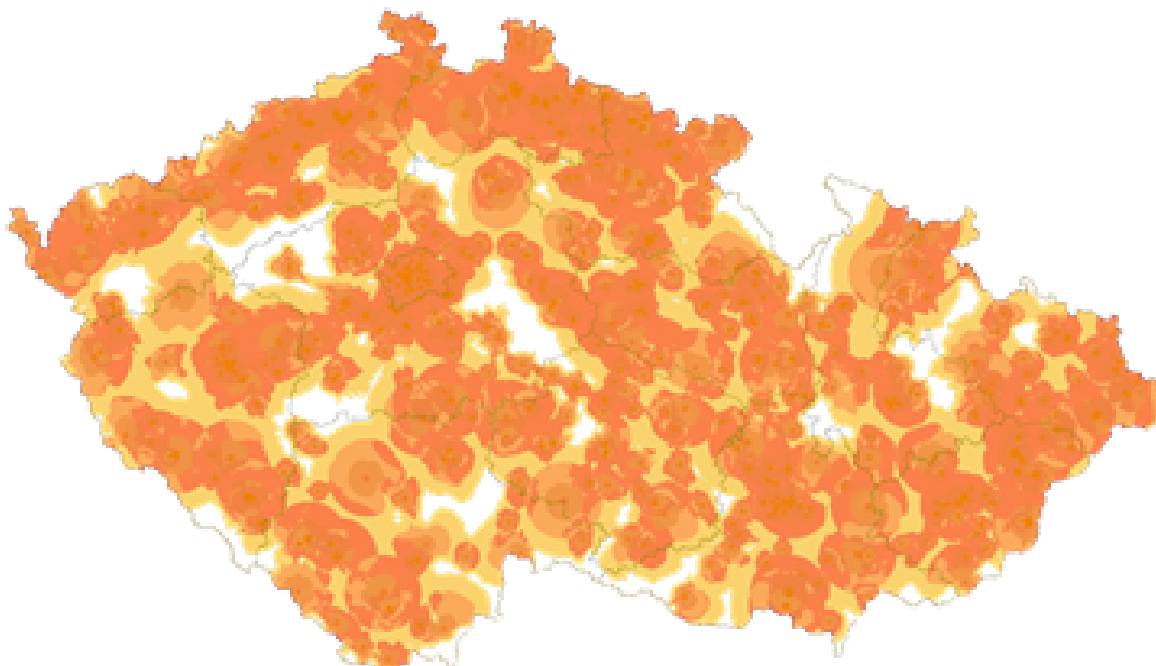
2.1 LoRa

LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) je volně přístupná technologie (síťový protokol), kterou si u nás vybraly CRA (České Radiokomunikace) pro budování sítě pro IoT. Jako druhý poskytovatel je jihočeský Starnet, ten však prozatím nemá pokrytí na území Moravy a Slezska. Narozdíl od Sigfoxu vznikla tato technologie díky více subjektům, takže lze využívat zařízení různých výrobců. Rádiová komunikace v síti LoRaWAN je především určena pro přenos menšího množství informací na velkou vzdálenost a mezi její největší výhodu patří nízká energetická náročnost a díky tomu je výsledné zařízení schopno vydržet několik let při provozu z baterie. Rychlost přenosu se pohybuje od 300 bit/s do 50 000 bit/s v nelicencovaném pásmu na frekvenci 868 MHz. Jako velkou výhodou lze považovat nemožnost připojení zařízení (senzor, čidlo nebo měřič) do sítě, pokud nedostane od CRA certifikaci. To nutí výrobce IoT zařízení daný produkt certifikovat, což je z bezpečnostního hlediska důležité. Další výhodou je obousměrná komunikace, což dovolu je zařízení bez problémů aktualizovat, a bezpečnost, protože data jsou uložena na cloudu od CRA na území ČR (dobře zdokumentované API). Narozdíl od NB-IoT lze signál dotáhnout kamkoli za pomoci tzv. Pico Gateway bez ohledu na pokrytí signálem. Díky obousměrné komunikaci lze v zařízení průběžně opravovat chyby a nahrávat nový firmware. Cena závisí na počtu připojených zařízení do sítě, a také na objemu přenesených dat, z čehož plyne menší nevýhoda, kterou je problematický odhad ročních nákladů na provoz. Naštěstí CRA nabízí startovací balíčky, kde je možné si vše nejprve vyzkoušet. Využití této technologie bude především v aplikacích, kde je nutné často komunikovat a odesílat data při minimální spotřebě elektrické energie, především při monitorování podmínek v okolí zařízení (teplota, tlak, vlhkost, lokace, monitoring zdraví aj.). Dosah LoRaWAN bývá až 20 km ve volném prostranství a až 5 km v hustě obydlených oblastech. Cena komunikačního čipu se pohybuje kolem 120 Kč, ale předpokládá se postupné snižování až k 50 Kč jako u Sigfoxu. [3]

Každé zařízení se musí do sítě zaregistrovat buď pomocí metody OTAA nebo ABP. Metoda OTAA používá k registraci DevEUI, AppEUI a AppKey. Klíče jsou generovány až v případě potřeby, např. pokud dojde ke změně sítě, zařízení se připojí a vygenerují se mu nové klíče. První je navázáno spojení a až poté se zahajuje komunikace. Nevýhodou je nutnost ukládat dynamicky generované klíče.

Druhá metoda nevyžaduje předchozí klíče, ale využívá uložené klíče v zařízení (NwkSKey, AppSKey) a dále je nutné zadat DevAddr a DevEUI pro aktivaci. V tomto případě zařízení okamžitě komunikuje bez předchozího spojení, což je výhodou. Klíče musí být jedinečné a při změně sítě je nutné klíče přeprogramovat kvůli možnému ohrožení zabezpečení.

V případě vytvoření vlastní brány Lora je nutný přístup k internetu a je možné ji zaregistrovat do infrastruktury The Thing Network, která tuto službu nabízí. Díky tomu lze vytvořit vlastní LoRa síť kdekoli není síť dostupná. Toto řešení je výhodné pro velké podniky, které využívají LoRa zařízení a chtějí ušetřit za používání cizích služeb.[4]



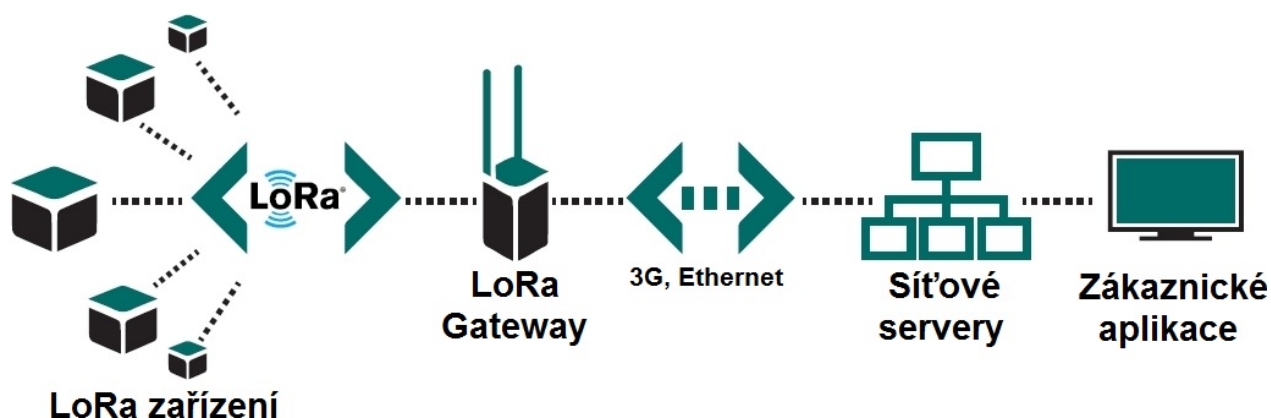
Obrázek 2.1: Pokrytí LoRaWAN signálem [1]

2.1.1 Rádiový přenos a modulace

LoRaWAN je síť s rozprostřeným spektrem, která se vyznačuje nízkou spotřebou, dlouhým dosahem a je předurčena pro senzory napájené z baterie. Výdrž takovýchto zařízení je několik let a jsou schopny se spolehlivě připojit k velkým sítím na kilometry daleko. Využívá se hvězdicové topologie, síť tvoří koncová zařízení a brány. Každé zařízení vysílá zprávy ke všem branám v dosahu. Tato brána poté pošle data na cloud pomocí internetového připojení. Pokud byla přijata stejná zpráva vícekrát, uloží se pouze jedna zpráva. Tímto je ošetřena duplicita datových záznamů.

LoRaWAN definuje komunikační protokol a síťovou architekturu systému, zatímco fyzická vrstva zajišťuje komunikační spojení. Protokol a síťová architektura nejvíce ovlivňují životnost baterie, kapacitu sítě, kvalitu služeb a bezpečnost. Síťová topologie je typu hvězda, centrálním bodem jsou brány pro přenos zpráv mezi koncovými zařízeními a hostitelským serverem (WiFi, Ethernet, mobilní síť). Pro zajištění komunikace s koncovými zařízeními používá fyzickou vrstvu od společnosti Semtech, která je spolehlivá a zaručuje komunikaci na dlouhé vzdálenosti. Komunikace je zabezpečena šifrováním AES pomocí klíčů síťové nebo aplikační relace. Standardizaci a rozvoj protokolu LoRaWAN se stará nezisková organizace LoRa Alliance. Komunikace s koncovými zařízeními je obousměrná. Specifikaci komunikačního protokolu LoRaWAN definují tři různé třídy koncových zařízení, které umožňují vyrovnat spotřebu energie s latencí odezvy:[5][6]

- **Třída A** – koncová zařízení této třídy mohou přijímat data pouze během dvou krátkých oken pro příjem dat. Vhodné pro zařízení s nízkou spotřebou elektrické energie (IoT senzory).



Obrázek 2.2: Architektura LoRa sítě [3]

- **Třída B** – stejná jako třída A, navíc jsou přidány přijímací okna, která se otevírají v danou dobu. Vhodné pro IoT zařízení se sníženou latencí i za cenu zvýšené spotřeby při příjmu.
- **Třída C** – tato zařízení poskytují nepřetržité přijímací okno, které se uzavírá pouze v případě vysílání. Vhodná pro použití v branách LoRaWAN, kde je žádoucí nepřetržité naslouchání.

LoRa je modulace patentovaná firmou Semtech a využívá kódování 4/5, dopřednou korekci chyb a modulaci Chirp-FSK. LoRa byla navržena jak pro evropské pásmo 868 MHz, tak i pro americké pásmo 915 MHz. Výhodami a zároveň nevýhodami je to, že tyto pásma nejsou placená a volná. Citlivost je -136 dB a odolnost vůči rušení je -16 dB (pod úrovní šumu), dosah při přímé viditelnosti je maximálně 40 km (ideální podmínky, reálně menší). Maximální vysílací výkon je 25 mW/14 dBm. [6]

Modulace LoRa je patentově chráněna a založena na modulaci Chirp, která rozprostírá signál po celém vysílacím pásmu (125 kHz, 250 kHz, 500 kHz), podobně jako DSSS, FHSS aj. Chirp modulace využívá lineární změny frekvence (oproti DSSS a FHSS, které mění kmitočet skokově) a na tento signál je modulována přenášená informace, z čehož plyne větší odolnost vůči Dopplerovskému jevu a současně snižuje nároky na zdroj kmitočtu. Navíc jeden kanál může využívat několik vysílačů současně. Modulace má několik volitelných možností pro rozprostření (Spreading factor) a šířku pásma, které jsou pevně stanoveny ke každé datové rychlosti (Data Rate), což je jediný parametr, který by měl uživatel nastavovat. Další možností je ADR (Automatic Data Rate), který automaticky zvolí nejvyšší možnou přenosovou rychlost na základě síly signálu naměřeného branou. Toto je vhodné pro stacionární aplikace. Parametry modulace pro dané přenosové rychlosti jsou v následující tabulce: [6]

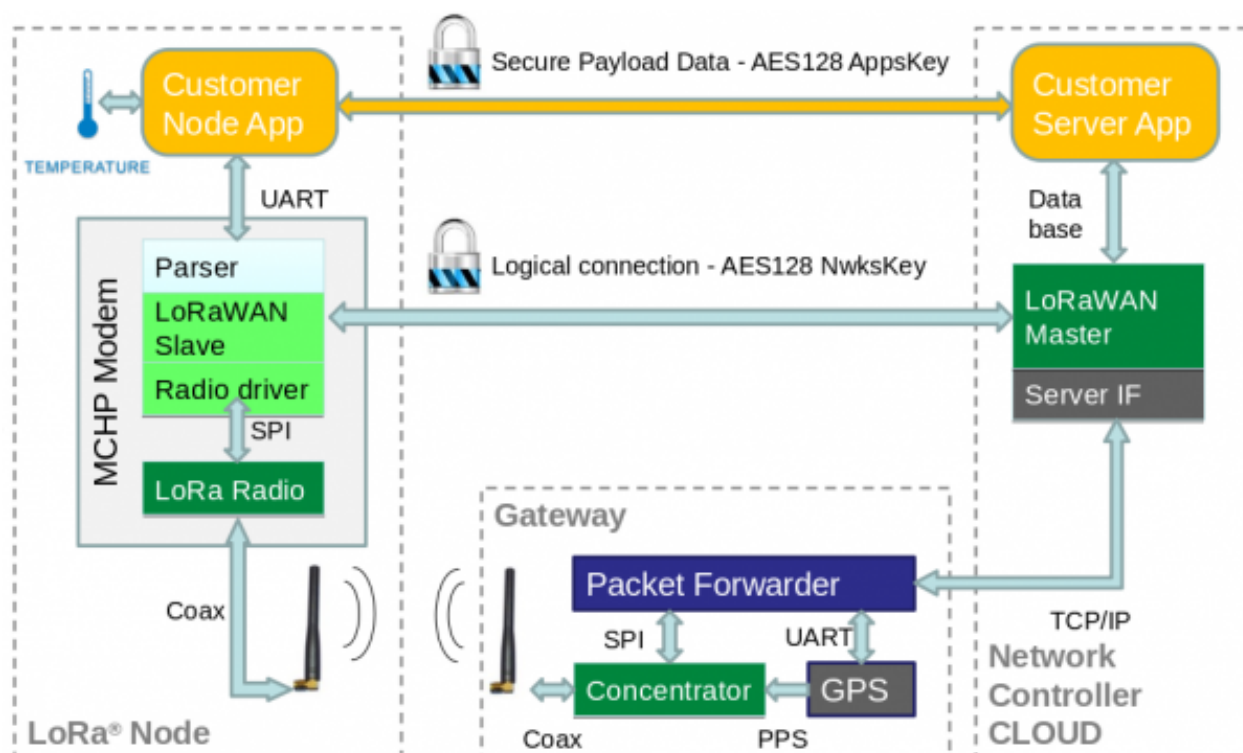
2.1.2 LoRaWAN protokol

Protokol LoRaWAN garantuje bezpečný přenos dat mezi koncovými zařízeními. Každý z těchto zařízení má přidělený jedinečný 64bitový identifikátor a dva 128bitové klíče, které slouží k zašifrování

Tabulka 2.2: Parametry modulace pro jednotlivé datové rychlosti[6]

Datová rychlost (DR)	Rozprostření (SF)	Šířka přenosového pásma (kHz)	Přenosová rychlost (baud)	Citlivost přijímače (dBm)
0	12	125	292	-136
1	11	125	537	-133
2	10	125	976	-132
3	9	125	1757	-129
4	8	125	3125	-126
5	7	125	5468	-123
6	7	250	10937	-120
7	modulace FSK		50 k	-108

dat (AES). První klíč slouží pro šifrování v rámci sítě (kvůli více sítím na stejném území), druhý k zašifrování mezi sítí a uživatelskou aplikací. Rychlost přenosu je 250 bitů/s až 50 kbitů/s. Počet zpráv za den není nijak omezen. Maximální délka zprávy je 256 bajtů. [6][3]

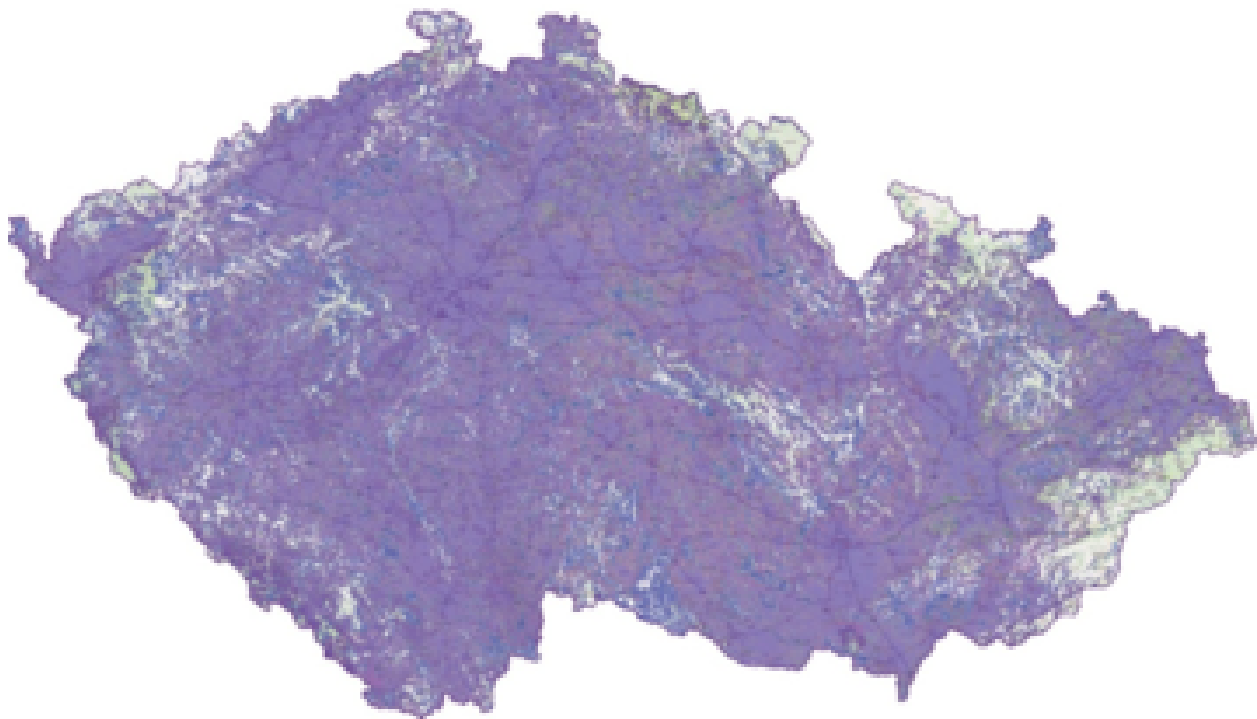


Obrázek 2.3: LoRaWAN protokol [6]

2.2 Sigfox

Francouzská firma Sigfox vznikla v roce 2009 a stará se o výstavbu bezdrátových sítí pro nízkoenergetická zařízení jako jsou elektroměry, chytré hodinky, pračky jenž jsou stále v provozu a posílají malé množství dat. Ústředí Sigfoxu se nachází v Labège poblíž Toulouse ve Francii a má i několik poboček po celém světě.

Českým technologickým partnerem pro Sigfox se stala firma T-Mobile. Sigfox Česká republika (dříve SimpleCell) je prvním českým veřejným mobilním operátorem sítě určené pro Internet věcí na technologii Sigfox. Pokrytí signálem je téměř po celé ČR kromě vysokohorských oblastí, kde je problém s pokrytím největší. Konkrétně je ke konci roku 2020 pokryto 96 % České republiky, takže dosahuje i do míst, kde není GSM signál. Každé Sigfox zařízení obsahuje komunikační čip, který je nutný pro komunikaci v rámci sítě Sigfox. Tento čip používá unikátní 32bitové Sigfox ID vygenerované hned při výrobě místo používání SIM karty nebo IP adresy. Rychlost přenosu dat po síti Sigfox je pouze 100 bit/s. Tato rychlost je nastavena cíleně ze strany Sigfoxu, aby každé zařízení nemohlo vyslat více než 144 zpráv denně po 12 bajtech. Tímto je i zajištěna malá spotřeba elektrické energie a tato zařízení jsou schopna vydržet až 15 let na jednom místě bez výměny. Nevýhodou Sigfoxu je obousměrná komunikace, která je aktivována pouze na vyžádání koncovým zařízením, a proto se spíše hodí pro komunikaci jednosměrnou. Sigfox tedy najde využití v aplikacích, kde není nutné často komunikovat a primárně je sběr dat jednosměrný nikoli řízený. Další nevýhodou je složitá až nemožná aktualizace připojených zařízení, občas problémy s připojením kvůli nízkému počtu gatewayí a komunikace nefunguje za pohybu, což značně omezuje možnosti využití v praxi. Při přenášení dat zařízení posílá data na nejbližší stanici a ta je převede do cloudu (Francie). Odtud jsou data pomocí aplikačních rozhraní získávána do vlastních aplikací k dalšímu zpracování. Rovněž jako u dalších sítí je obtížné spočítat finanční náklady spojené s používáním této sítě, protože se cena odvíjí od počtu připojených zařízení a objemu přenesených dat. Oproti CRA (LoRa) nenabízí firma Sigfox Česká republika startovací balíčky za účelem vyzkoušení. Způsob expanze této technologie je takový, že si Sigfox najde v zemi lokálního partnera, který pomůže nebo poskytne síť pro jejich zařízení. Dosah signálu je maximálně 50 km ve volném prostoru a až 5 km v hustě obydlené oblasti. Cena čipu se pohybuje kolem 50 Kč. Základní cena služby (přibližná) se pohybuje od 140 - 250 Kč/zařízení/rok.[7]



Obrázek 2.4: Pokrytí Sigfox signálem [1]

2.2.1 Rádiový přenos a modulace

Technologie Sigfox využívá bezlicenční pásmo ISM na frekvenci 868 MHz v Evropě a 902 MHz v USA. Toto pásmo využívají krátkodosahová zařízení jako jsou bezdrátová měřidla, domácí meteorostanice nebo ovládání garážových vrat. Díky tomu, že v tomto pásmu neběží jiná bezdrátová technologie (Wi-Fi, Bluetooth), tak není toto pásmo těmito jinými technologiemi rušeno. Sigfox využívá signál s dlouhým dosahem, který prochází skrze pevné objekty (Ultra Narrow band) a přesto vyžaduje jen málo elektrické energie (maximálně 100 mW) a modulaci v 200kHz veřejném pásmu. Každá zpráva při přenosu zabírá 100 Hz ze šířky pásma a je přenášena rychlostí 100 bitů/s (některé regiony až 600 bitů/s). Vysílaná zpráva využívá DBPSK modulaci, které stačí pro přenos jednoho bitu frekvenční pásmo o šířce 1 Hz. Citlivost přijímače je regulována podle přenosové kapacity, která může být -142 dBm při rychlosti 100 bitů/s nebo 134 dBm při rychlosti 600 bitů/s. Tato síť se řadí do kategorie LPWAN (Low-Power Wide-Area Network) a je založena na hvězdicové topologii, která zaručuje, že mezi dvěma stanicemi existuje pouze jedno spojení. Vznik takového provozu vyžaduje mobilního operátora, který jej zajistí a signál tak může pokrýt velkou oblast a to včetně podzemních objektů. Menší nevýhodou je omezená obousměrná komunikace ISM pásma. Sigfox momentálně na-

bízí maximálně 144 uplink zpráv a 4 downlink zprávy denně na jedno zařízení. Každý uplink může nést data až o velikosti 12 bajtů a každý downlink může mít velikost až 8 bajtů. Hlavní výhodou je velká bateriová výdrž, relativně velký dosah, odolnost sítě vůči rušení, cena čipu a nemožnost zneužití sítě.[8]

2.2.2 Architektura sítě

Komunikační síť pro sigfox je založena na hvězdicové topologii a je budována na buňkovém principu. Každé Sigfox zařízení může vysílat svá data do Sigfox sítě, pokud je rádiový signál v dosahu gatewaye (základnová stanice). Tyto stanice využívají Sigfox operátory, kteří následně odesílají zprávy do cloudu přes TCP/IP komunikaci. Základnové stanice umí detekovat příchozí zprávu, tu následně demodulují pro Sigfox cloud. Zde jsou zprávy přetříděny a poslány do zákaznických zařízení a IT platform pomocí TCP/IP internetové komunikace. Data v Sigfoxu nemají definovanou vnitřní strukturu a je jen na odesílateli a příjemci, jaká data budou do prostoru dat vložena a jak se budou na druhé straně interpretovat. Tato „druhá strana“ přijímá data ze Sigfox cloudu (vytvářen provozovatelem Sigfox sítě) a přistupuje k nim pomocí softwarového rozhraní (API) ze své vlastní aplikace nebo systému. Příkladem může být senzor, který zaznamená výraznou změnu měřené veličiny a odešle zprávu do sítě. Tuto zprávu lze přečíst pomocí mobilní aplikace, PC, HMI nebo jakéhokoli zobrazovacího zařízení, které se k těmto datům dokáže pomocí příslušného API dostat.



Obrázek 2.5: Architektura Sigfox sítě [8]

Každé koncové zařízení obsahuje interní identifikátor, který jednoznačně identifikuje zařízení (sériová čísla) a nevyužívá oproti jiným technologiím ani IP adresování, ani SIM karty apod. Každý Sigfox modul je vybaven certifikátem s unikátním identifikátorem zařízení, teoreticky je to velmi podobné MAC adresování a množství adresovaných zařízení v síti není obsluhově omezeno. Reálným

omezením pro gatewaye jsou podmínky všeobecného oprávnění, které ovlivňují dobu, po jakou smí stanice vysílat. Tím je omezen i počet zpráv, které mohou přes danou stanici maximálně „projít“.[8]

2.2.3 Komunikační protokol

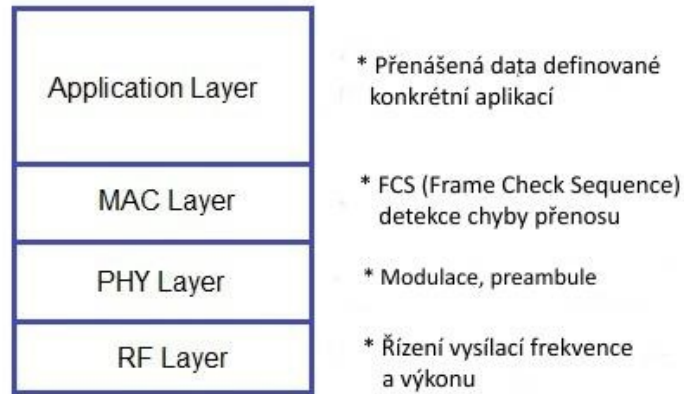
Přenosový protokol byl záměrně vytvořen pro přenos malých zpráv. Čím méně dat se posílá, tím menší je spotřeba elektrické energie a delší bateriový provoz. Celkový přenosový rámec je složen z 26 bajtů, kde nultý až dvanáctý bajt je určen pro data (Payload), zpětný kanál je omezen pouze na 8 bajtů užitečných dat s maximálně 4 zprávami za den. V porovnání např. s TCP/IP je tento protokol vhodnější, protože jen záhlaví komunikačního rámce IP stacku má 40 bajtů a to i v případě přenosu pouhých 12 bajtů jako při komunikaci Sigfoxu.

Charakteristickým rysem IoT sítí je malá přenosová rychlost 100 bitů/s, která je však pro IoT dostačující. Přenos 12 bajtů užitečných dat se přenáší přes 2 sekundy, což je relativně pomalé, ale na druhou stranu to vyvažuje jednoduchost, robustnost a nízká cena zařízení oproti přenosu dat po síti GSM. Předpokladem je vysílání dat pouze několikrát za den, při neaktivním vysílání je zařízení uspáno za účelem šetření energie. Sigfox je vhodný pro zařízení vysílajících několik zpráv denně např. ze stacionárních objektů (automaty). Odesílaná zpráva (12 bajtů dat) může v praxi reprezentovat 2 GPS souřadnice s přesností na 3 metry, šest teplotních měření od -100 °C do +200 °C (přesnost 0,004 °C), dvanáct měření z radaru do rychlosti 255 km/h a 96 dvoustavových signálů. Zpětný kanál (8bajtový) by měl být dostačující pro změny rozsahu senzoru, změny frekvence vysílaných zpráv, zapnutí/vypnutí nějaké funkce atd. Takto lze třeba vypnout/zapnout energeticky náročnější (GSM, WiFi) způsob komunikace na dálku např. za účelem přehrání softwaru.[8]

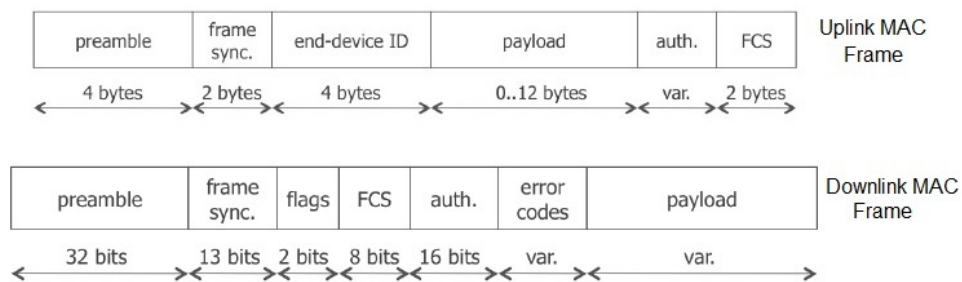
Standardní komunikační OSI model Sigfox komunikace lze rozdělit na:

- **Rádiovou vrstvu (RF layer)** – slouží k řízení frekvence a úrovně vysílacího výkonu.
- **Fyzickou vrstvu (PHY layer)** – slouží k vložení (při vysílání) nebo vyjmutí (při příjmu) tzv. preamble definující adresu cílové stanice/jednotky.
- **Síťová vrstva (MAC layer)** – vytváří komunikační rámec pro vysílání nebo „dekóduje“ rámec po příjmu (ID adresu, synchronizaci rámce, kontrola chyb FCS).
- **Aplikační vrstva (Application layer)** – vkládá užitečná data definovaná konkrétním SW aplikací.

Ze struktury OSI modelu pak vychází struktura odchozího rámce (Uplink) i příchozího rámce (Downlink) každé Sigfox jednotky. [8]



Obrázek 2.6: Sigfox přenosový OSI model [8]



Obrázek 2.7: Struktura Sigfox rámce [8]

Příjem zpráv funguje podobně jako třída A u technologie LoRa. Zařízení se tedy samo rozhoduje, kdy bude přijímat zprávy. Většinou se tak děje ihned potom, co samotné zařízení vysílalo, aby obdrželo potvrzení o přijetí druhou stranou. Do tohoto zařízení lze tedy zaslat data nebo příkaz a dále už záleží na samotném zařízení, kdy se opět „probudí“ a něco pošle. Výhodou je velmi nízká spotřeba koncových zařízení a z toho plynoucí dlouhý bateriový provoz až několik let. Typicky je spotřeba při vysílání cca 30 mA a vysílací výkon je +14,5 dBm. Pokud je zařízení „uspáno“, tak je spotřeba proudu jen několik nanoampér při napájení 1,9 - 3,6 V. Maximální výdrž zařízení je samozřejmě dána kapacitou baterie, množstvím a velikostí vysílaných zpráv a spotřebou senzorické části. [8]

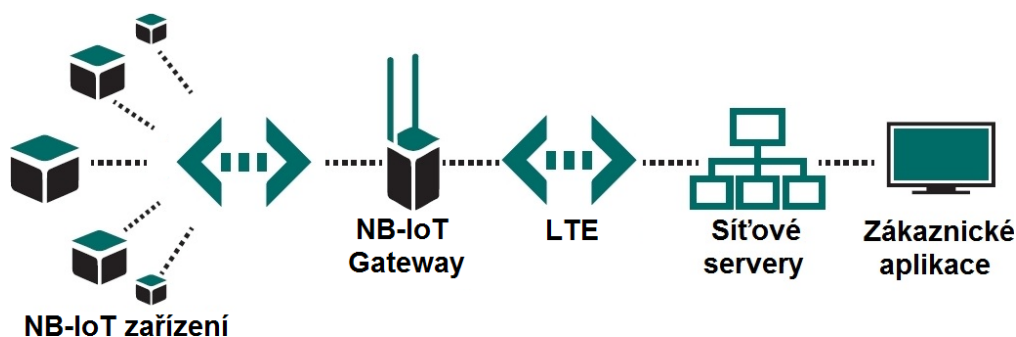
Sigfox je technologie vhodná pro časově velmi pomalé procesy (elektroměr) s malou četností zasílání informačních zpráv nebo informuje o poruše. V tomto směru nahrazuje dříve populární zasílání informačních zpráv pomocí SMS. Nejde o přímého konkurenta rychlých průmyslových sběrnic, rychlých bezdrátových technologií ani středně rychlé LTE komunikace, ale spíše se jedná o doplněk k těmto technologiím. Konkurentem se stává technologie LoRa, která je velmi podobná, i když s odlišnými parametry komunikace (množství zpráv, dosah, příkon). Hlavní důvod vzniku byla maximální úspora energie a to je i důvod nejmenší datové přenosové kapacity.[8]

2.3 NarrowBand

Za sítí Narrow Band IoT (NB-IoT) stojí v ČR mobilní operátoři a komerčně ji prozatím provozuje pouze Vodafone, ostatní operátoři jsou ve fázi testování. Oproti poskytování Sigfoxu a LoRaWANu využil již vytvořenou infrastrukturu, aby nemusel investovat do vytváření nové a pouze upravil software na svých vysílacích stanicích. To má za následek vyhrazení části LTE pásma pro IoT zařízení. Velkou nevýhodou této technologie je spotřeba elektrické energie a to i přitom, že nevyužívají energeticky i datově náročnější 3G a 4G sítě. Dalším důvodem proč si Vodafone a O2 vybrali LTE pásmo, je ten, že v ostatních sítích fungují i mobilní zařízení, které s ústřednami komunikují mnohem častěji, což by mohlo způsobit problémy. Narozdíl od Sigfoxu musí zařízení pro komunikaci podporující NB-IoT technologii obsahovat SIM kartu, která je už zabudovaná v komunikačním modulu zařízení a koncový uživatel (zákazník) ji při spuštění aktivuje a následně může zařízení propojit s NB-IoT sítí. Opět nelze určit přesnou cenu za roční provoz, protože se značně liší od počtu zařízení. Výhodou je nabízený startovací balíček obsahující půlroční testování a 20 SIM karet v ceně. Cena za tento balíček se bohužel neuvádí a pravděpodobně bude individuální v závislosti na tom, k čemu bude přesně IoT technologie využita. Cena komunikačního čipu se pohybuje kolem 300 Kč, což značně prodražuje výsledné zařízení. Dosah signálu je kolem 20 km a zařízení by měla být schopna komunikovat kdekoli, kde je dostupné LTE. Hodí se především pro aplikace s obousměrnou komunikací a náročnějšími datovými toky. Nejčastěji se lze s touto technologií setkat u tzv. chytrých měst, hlídání přepravních kontejnerů, v zemědělství a další.[3][1]

2.3.1 Architektura sítě

NB-IoT je bezdrátová úzkopásmová LPWAN technologie pro IoT. Největší předností je její nasazení v pásmech GSM a LTE, a proto není nutné budovat oddělenou novou síť. Oproti technologii Sigfox a LoRa není nutné instalovat dodatečné antény, stačí pouze SW update na stávající infrastrukturu a vyhradit se část LTE pásma. Využívá se LTE pásmo, protože 4G a 3G sítě jsou pro IoT zařízení nevhodné jak po datové tak po stránce spotřeby elektrické energie. U 4G a 3G jsou vysílány velké množství dat pro zahájení a ukončení komunikace, což je pro IoT nepraktické. Oproti sítím Sigfox a LoRa je pokrytí na území České republiky sítí NB-IoT menší. Vodafone má však pokryto 99 % území sítí LTE a přechod na NB-IoT je jen otázkou aktualizace softwaru. Lze předpokládat, že další růst bude rychlý. Vzhledem k tomu, že NB-IoT využívá LTE pásmo, tak komunikační modul musí obsahovat SIM kartu. Uživatel zakoupí modul a následně musí SIM kartu aktivovat ke spojení s NB-IoT sítí. Stejně jako u sítě Sigfox a LoRa se poplatky odvíjí od počtu připojených zařízení a množství přenesených dat. Zařízení přijímají nebo vysílají data z nejbližší gatewaye, odkud jsou posílány do serveru, kde jsou uložena, zpracována a poskytnuta koncovému uživateli přes webové rozhraní či mobilní aplikaci.[3][9]



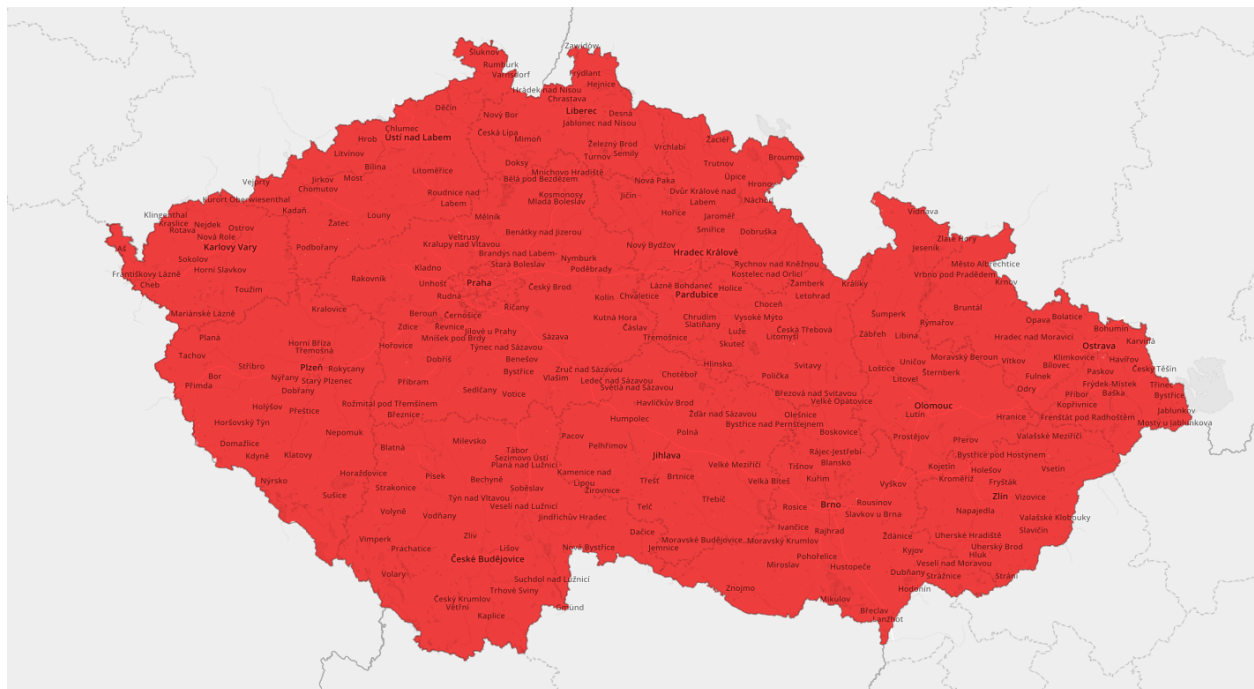
Obrázek 2.8: Architektura sítě NB-IoT [3]

2.3.2 Komunikační protokol

Komunikace je obousměrná bez omezení počtu odeslaných a přijatých dat. Každá zpráva může mít maximálně 1280 bajtů a přenosová rychlost je 50 kbitů/s. Datový přenos je chráněn LTE šifrováním.[4]

2.3.3 Rádiový přenos a modulace

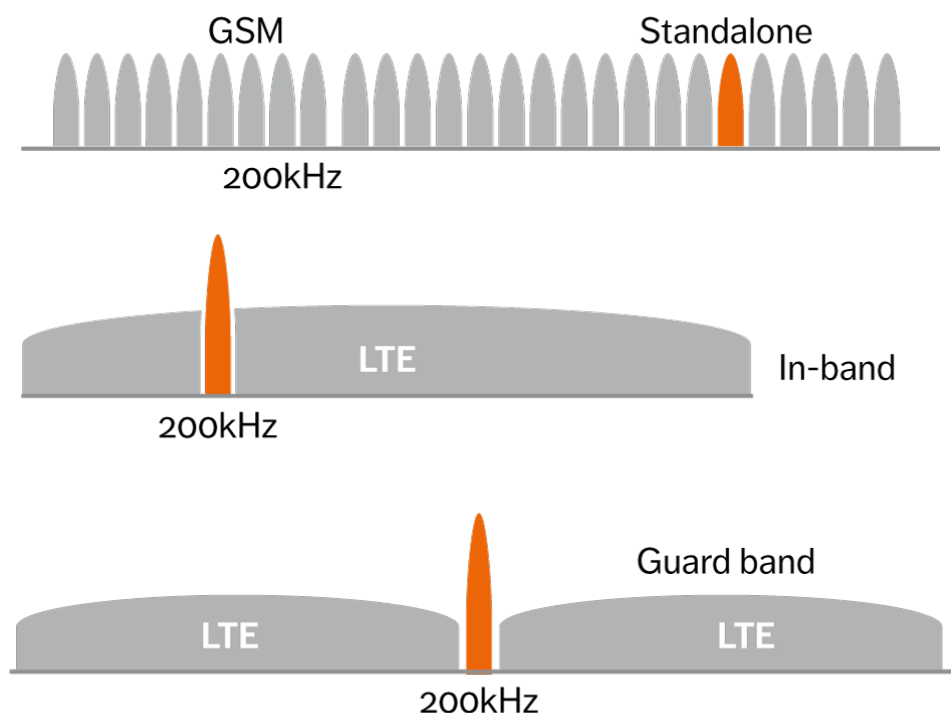
NB-IoT využívá licencovaného pásma 700-900 MHz, šířka pásma je 200 kHz, přenosová rychlost je až 50 kbitů/s. Pro downlink se využívá OFDMA modulace, pro uplink FDMA s GMSK modulací popř. SC-FDMA. Jelikož je využito mobilní sítě, je nutné mít v každém zařízení aktivovanou SIM kartu. Mezi nejznámější podporovatele této technologie se řadí firmy jako je Alcatel-Lucent, Deutsche Telekom, Ericsson, Samsung, Vodafone, Telefonica a mnoho dalších. Za účelem dosažení co



Obrázek 2.9: Mapa pokrytí sítí NB-IoT [3]

nejlepšího využití spektra byla technologie NB-IoT navržena s řadou možností nasazení pro GSM, WCDMA nebo LTE:[9][4]

- **Standalone** – Tato metoda nahrazuje GSM nosiče s NB-IoT nosičem (využití především v oblastech se souběžným pokrytím GSM a WCDMA/LTE). Umožňuje velmi rychlé nasazení a provozování.
- **In-band** – Neefektivnější, nasazení skrze flexibilní využití části LTE nosiče. Do nosiče LTE pásma je vložen NB-IoT signál. Jedná se o nejvhodnější řešení s nízkými náklady. Jedna taková buňka ,viz Obrázek 2.10, dokáže pojmout až 200 000 zařízení pro běžné použití. Pokud by kapacita nebyla dostatečná, je možné přidat více nosičů NB-IoT signálu.
- **Guard-band (ochranné pásmo)** – Princip nahrazení ochranného pásma NB-IoT pásmem.



Obrázek 2.10: Možnosti nasazení NB-IoT [9]

2.4 IQRF

Bezdrátová technologie IQRF je výtvořem české společnosti Microrisc s.r.o. a je oproti všem předešlým technologiím značně odlišná. Jedná se o technologii využívající MESH topologie a vyžaduje vytvoření vlastní komunikační sítě pomocí speciálních transceiverů o velikosti SIM karty. Jejím cílem je přenos malého množství dat na kratší vzdálenosti s minimální spotřebou elektrické energie. Maximální dosah je 500 m ve volném prostranství bez použití externí antény. V zastavěné části a především v budovách je dosah daleko menší. Komunikace je obousměrná a není nijak omezena počtem zpráv. Využití této technologie je především v oblasti IoT, telemetrii, průmyslovém řízení, automatizaci budov a měst (parkoviště, veřejné osvětlení). Do internetové sítě a ke cloud serveru se připojují pomocí gatewayí.

2.4.1 Rádiový přenos

IQRF využívá bezlicenční pásmo 868 MHz, 916 MHz nebo 433 MHz (celosvětově). Při využití frekvence 868 MHz (Evropa) je možné provozovat až 62 kanálů s šířkou pásma 100 kHz, při využití frekvence 916 MHz je možné provozovat až 189 kanálů, při frekvenci 433 MHz pouze 16 kanálů.

Maximální přenosová rychlost je 19,836 kb/s, což je pro řízení nebo přenos hodnot ze senzorů úplně dostačující. Každý paket umožňuje přenos až 64 bajtů uživatelských dat, daný paket se pak přenáší 30 až 50 ms. S tímto údajem je nutné počítat, protože pokud je v síti 100 směřujících nodů a každý z nich bude vysílat 50 ms, tak odvysílání zprávy bude trvat 5 s. Pokud by se jednalo o sběr dat např. ze senzorů, tak by byla doba dvojnásobná. Vysílací výkon je nastavitelný od 3,5 mW až do 12,5 mW, případně lze nastavit automatické nastavení vysílacího výkonu.[10][11][4][12]

2.4.2 Architektura sítě

Technologie IQRF zahrnuje dva typy komunikačních módů:

- **Peer-to-peer (nesíťový mód)** - Nesíťový mód tvoří dva nebo více peer-to-peer zařízení spojených přímou vazbou, pakety jsou přístupné pro všechna zařízení v dosahu a tento mód nepodporuje žádné síťové funkce (routování), pouze jednoduché adresování. Využívá se pouze při propojení dvou zařízení.
- **Mesh (síťový mód)** - Síťový mód používá IQMESH protokol a umožňuje propojit až 240 zařízení. V takové síti musí být minimálně jeden koordinátor sítě, který celou síť řídí a zbytek modulů fungují jako uzly sítě. Transceivery mohou vykonávat jak funkci koordinátora, tak i nodu, konfigurace záleží na nahraném hardwarovém profilu.

V IQMESH síti jsou pakety doručovány pomocí routování podobné klasické ethernetové síti a odstraňuje nedostatky hvězdicové topologie. Příkazy putují od koordinátora sítě ke koncovému nodu přes ostatní nody, pokud není cílový nod v dosahu samotného koordinátora sítě. Jedná se o velmi robustní a spolehlivou metodu pro odesílání a příjem dat. Tento protokol je zahrnut v operačním systému transceiverů a jeho implementace je jednoduchá. Každá síť má ale své omezení a tím je maximální počet zařízení. Síť může obsahovat maximálně 240 zařízení, z nichž 1 zařízení musí vykonávat funkci koordinátora. V případě potřeby lze vybudovat další síť a každé zařízení může být součástí dvou nezávislých sítí.

Při vytváření sítě je nutné přiřadit každému nodu adresu a tento nod přibondovat ke koordinátorovi sítě. Poté je nutné síť zmapovat pomocí funkce „Discovery“, kdy stačí tuto funkci spustit a síť je automaticky zmapována. Díky tohoto zmapování se propojí všechny nody v dosahu. Pokud data putují z jedné strany sítě na druhou a koordinátor není v přímém spojení s koncovým nodem, tak jsou pakety přeposílány od jednoho nodu ke druhému. V případě výpadku jedné cesty je nalezena jiná a tím je při dobrém návrhu sítě zaručena 100% spolehlivost doručení paketu. [11][4]

Transceivery, které budou tvořit MESH síť musí být do sítě připojeny pomocí přibondování. Bondování lze provést buď pomocí tlačítka na modulu a adresaci přes PC nebo lze moduly přibondovat vzdáleně. Vzdálené bondování funguje tak, že se nejprve vyčtou informace z modulu a ty se následně zapíší do koordinátora a tímto je modul připojen k síti. Této metody se využívá při roz-

sáhlejších aplikacích, na špatně přístupných místech nebo pokud není přístup k samotnému modulu (krabička).

Pro využití v IoT je nutné tuto síť připojit do Internetu. Toho se dá dosáhnout použitím IQRF brány, která data ze sítě pošle do cloudu. Zde IQRF nabízí svou vlastní bránu, kterou si lze zakoupit nebo je možné si ji vytvořit. Vlastní bránu lze zrealizovat pomocí koordinátora sítě připojeného např. k jednodeskovému počítači Raspberry Pi, který se postará o přenos dat z koordinátora do internetové sítě.

2.4.3 Operační systém

IQRF operační systém využívá dvouvrstvou architekturu, kde v první vrstvě je nahrán samotný operační systém (lze přehrát) a druhá vrstva obsahuje uživatelskou aplikaci, které je OS podřazena.

2.4.4 Způsoby programování

IQRF moduly je možné programovat dvěma způsoby. První přístup nabízí programování přímo pod operačním systémem, kdy je nutné celou uživatelskou aplikaci naprogramovat v jazyce C. IQRF samozřejmě poskytuje řadu dokumentací, kde jsou popsány různé funkce. Funkcionalita modulu je pak plně dána uživatelským programem. Nicméně tento způsob přístupu není podporován u síťového módu. Druhý způsob je s použitím DPA handleru, kde ovládání probíhá pouze tokem dat. Při použití handleru není potřeba modul programovat, ale lze jej upravovat popř. doplnit o svůj vlastní kód. V tomto případě se využívá hardwarových profilů, které upravují chování modulů. Tento přístup podporuje využití síťového módu.[11]

2.4.5 Spotřeba energie

Každý transceiver je možné provozovat ve třech režimech. První režim je označován jako STD (standard), při kterém je spotřeba elektrické energie nejvyšší, ale komunikace je nejrychlejší. Tohoto režimu se využívá při externím napájení ze sítě. Druhý režim je označován jako LP (low power), kterého se využívá při napájení z baterie a je energeticky méně náročný. Nicméně v tomto režimu je komunikace časově delší. Poslední režim je označován XLP (extreme low power), který je energeticky nejméně náročný. Pro každý režim lze využívat pouze omezených funkcí operačního systému.[11]

Kapitola 3

Návrh a realizace HW

Tato kapitola se zabývá návrhem a realizací hardwaru komunikační brány. Zařízení je navrženo modulárně tak, aby bylo možné dané moduly jednoduše vyměnit, protože dochází k neustálému vývoji a testování daných modulů. Vývojem je myšleno vylepšování chování a parametrů modulů popř. obměna za jiné integrované obvody. Vyvíjený prototyp bude použit jako část výsledku řešeného projektu na katedře kybernetiky a biomedicínského inženýrství spolu s firmou Microrisc, s.r.o., která především řeší vývoj nové verze Gateway Daemona.

Hlavní částí komunikační brány je základní deska plošných spojů, která slouží k propojení všech modulů. Momentální verze základní desky je koncipována jako vývojová deska, u které jsou moduly propojeny různými komunikačními sběrnicemi. Všechny vstupně/výstupní piny jsou vyvedeny na pinové lišty, kde je možné komunikaci odposlouchávat nebo dané moduly propojit mezi sebou pomocí jiné sběrnice dle vlastního uvážení.

Z důvodu nízké energetické náročnosti je nutné všechny moduly vypínat v případě nečinnosti, o což se stará řídicí modul. Zde bylo využito komerčního řešení od firmy Hardwarío. Tento modul je osazen energeticky nenáročným 32bitovým mikrokontrolérem a k tomuto modulu lze připojit i LoRa komunikační modul.

O napájení se stará modul zdroje, který je osazen dvěma 3A DC/DC měniči. První měnič je nastaven na pevnou hodnotu 5 voltů a slouží k napájení výpočetního modulu. Druhý měnič je nastaven na pevnou hodnotu 3,3 voltů a slouží pro napájení ostatních modulů. Při návrhu byla volena dostatečná proudová rezerva u měničů a energeticky náročnější moduly mají napájecí větve opatřeny vysokokapacitními kondenzátory, které „pokrývají“ proudové špičky.

Jediným modulem, který není nijak ovládán je modul dobíječe, který neustále kontroluje stav bateriových článků, a pomocí kterého je možné dobíjet baterii. Jako zdroj elektrické energie pro dobíjení lze použít jakýkoliv stejnosměrný zdroj napětí včetně solárního panelu. Dobíječ je nastaven na dobíjení dvou LiFePO₄ článků, dále obsahuje nadproudovou a přepětovou ochranu s balancérem článků a ochranu proti úplnému vybití baterie. Samozřejmostí je i monitorovací obvod, který dokáže odhadnout stav baterie a zpětným reportem předejít jejímu zničení.

V rámci IoT technologií byly zvoleny další komunikační moduly pro technologii LTE a IQRF. LTE modul je k základní desce připojen pomocí miniPCIe konektoru a IQRF modul je osazen v klasickém SIM konektoru.

3.1 Modul dobíječe

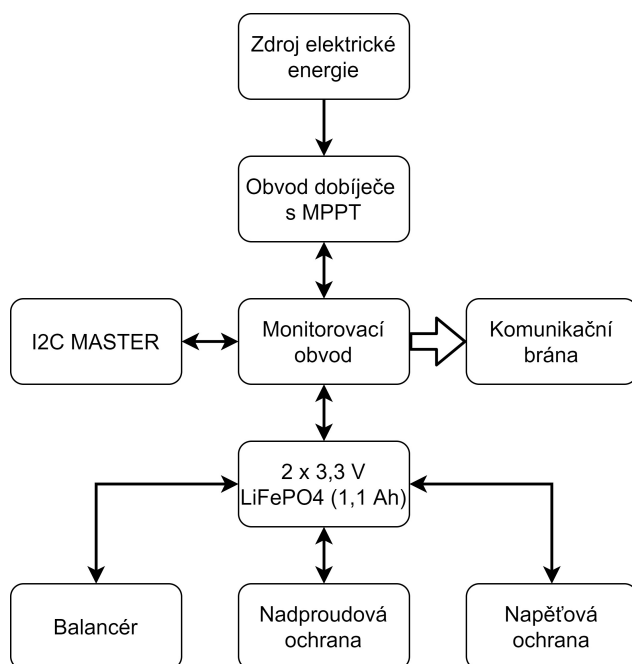
Hlavními částmi modulu dobíječe jsou obvod dobíječe BQ24650 pro různé chemie baterie a množství článků, monitorovací obvod MAX17261, obvod BQ29209 pro balancování článků a ochranný obvod proti přepětí a vybití baterie BQ296107. Za účelem ochrany článků proti zkratu (nadproudu) bylo využito komparátoru INA300. K ošetření dlouhodobého přetížení byl návrh doplněn i o pomalu reagující tavnou pojistku. Propojení jednotlivých obvodů a princip fungování modulu dobíječe je zobrazen na obrázku 3.1. Cílem návrhu bylo vytvoření funkčního modulu přizpůsobeného pro nabíjení dvou LiFePO_4 článků o maximálním nabíjecím proudu 2 A a nabíjecímu napětí 7,2 V. Vzhled DPS je zobrazen na obrázku 3.2.[13]

V prvotním návrhu byl zakomponován dobíjecí obvod LTC4015 od firmy Analog Devices, který měl v sobě implementovaný základní monitoring baterie (Coulombův čítač). Při testování se však zjistilo, že se dobíječ nechová úplně tak, jak by měl a řešení nebylo robustní. Při dotyku na DPS nebo v těsné blízkosti dobíjecího obvodu přestával obvod dobíjet a resetoval se. Z tohoto důvodu došlo k několika dalším přepracováním návrhu, bohužel beze změny k lepšímu výsledku. Toto se dělo i při zakoupení referenčního vývojového kitu, který měl také problémy se stabilitou, a tudíž bylo od tohoto řešení upuštěno. Nově zvolený dobíječ takové problémy nevykazoval.

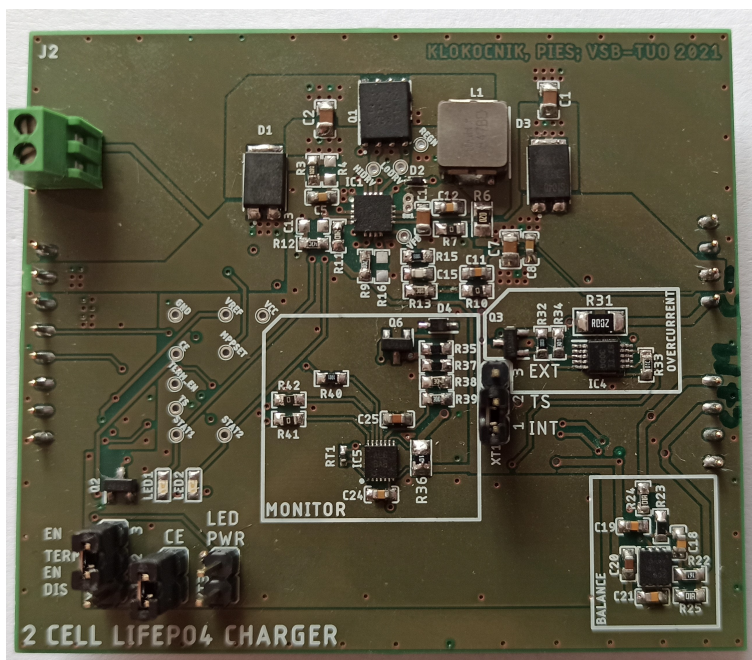
Pinů modulu dobíječe:

- **PGND** – Power Ground, výkonová zem
- **VIN** – Připojení zdroje elektrické energie pro dobíjení (solární panel)
- **SCL** – Serial Clock, hodinová linka I²C sběrnice
- **SDA** – Serial Data, datová linka I²C sběrnice
- **ALRT** – Alert pin, upozorňuje na příznak nějakého varování, upřesnění pomocí přečtení Status registru
- **TS** – Pin pro připojení externího termistoru
- **STAT1** – Status1 pin dobíječe
- **CELL+** – Pin pro připojení kladného pólu baterie
- **PACK_MID** – Pin pro připojení středního pólu baterie
- **CELL-** – Pin pro připojení záporného pólu baterie

- **PACK+** – Chráněný výstup z baterie, kladný pól
- **STAT2** – Status2 pin dobíječe



Obrázek 3.1: Blokové schéma modulu dobíječe



Obrázek 3.2: Osazená DPS modulu dobíječe

3.1.1 Dobíjecí obvod

Dobíjení baterie je řešeno pomocí dobíjecího obvodu BQ24650. Jedná se o obvod pro dobíjení Li-Ion, LiPo, LiFePO₄ a olovených baterií od firmy Texas Instruments, který disponuje technologií MPPT, která zaručuje optimální zatěžování solárního panelu tak, aby z něj byl získán co největší výkon. To v praxi znamená, že obvod snižuje výstupní dobíjecí proud na základě velikosti napětí na vstupní části. K dobíječi je možné připojit solární panel (nebo jiný zdroj elektrické energie) s výstupním stejnosměrným napětím 5-28 V. Nastavení MPPT bodu je programovatelné skrze napěťový dělič. Dále tento obvod obsahuje interní soft-start, vstupní přepětovou ochranu, ochranu proti přehřátí, sledování teploty baterie a detekci jejího vyjmutí. Stav dobíječe je možné monitorovat na dvou logických výstupech (pomocí LED). Dobíjení je nutné povolit manuálně nebo pomocí procesoru. Pokud není aktivní dobíjení (napětí na vstupu je menší než napětí baterie nebo je baterie nabita), přechází obvod do režimu spánku s minimálním proudovým odběrem, aby co nejméně zatěžoval baterii.[14]

Dobíjecí obvod BQ24650 dobíjí baterii ve třech fázích:

- **Pre-conditioning** – Předběžná stabilizace
- **Constant current** – Nabíjení konstantním proudem
- **Constant voltage** – Udržování konstantního napětí

Dobíjení je ukončeno, pokud dobíjecí proud klesne pod hranici 1/10 tzv. „fast charge rate“. Obvod je schopen automaticky rozpoznat úplně vybitou baterii a snaží se jí znovu nabít nejprve předběžným proudem, který je rovněž 1/10 maximálního proudu dobíjení. Časovač předběžení je fixně nastaven na 30 minut a nelze jej změnit. Dobíječem lze dobíjet baterie od 2,1 V až do 26 V. Nabíjecí proud je nastavitelný pomocí snímacího odporu a teoreticky není omezený. Výrobce však v datasheetu ke svému vývojovému kitu uvádí doporučený dobíjecí proud do 10 A.[15] Obvod je dostupný v 16pinovém QFN pouzdře a jeho stručný popis je popsán v příloze (složka Obvody).

3.1.1.1 Nastavení nabíjení

Nabíjecí napětí je nastaveno pomocí odporového děliče z výstupu baterie ke GND, přičemž střed děliče je připojen k pinu VFB. Napětí na VFB je regulováno na 2,1 V a pomocí následujícího vzorce je nastaveno nabíjecí napětí:

$$V_{BAT} = 2,1 \text{ V} \cdot \left(1 + \frac{R_{13}}{R_{15}}\right) \quad (3.1)$$

Kde R_{15} je rezistor připojený z VFB ke GND a R_{13} je připojený z VFB k baterii. Dosazením do vzorce a následným výpočtem získáme hodnoty R_{15} a R_{13} (popř. V_{BAT}).

$$V_{BAT} = 2,1 \text{ V} \cdot \left(1 + \frac{243 \text{ k}\Omega}{100 \text{ k}\Omega}\right) = 7,20 \text{ V} \quad (3.2)$$

V tomto případě se jedná o baterii, která se skládá ze dvou sériově zapojených LiFePO_4 článků, které mají doporučené nabíjecí napětí 3,6-3,65 V na článek, a proto je výsledná hodnota nabíjecího napětí baterie 7,2 V. Baterie LiFePO_4 umožňuje vyšší rychlost nabíjení a vybíjení, ale její hustota energie je nižší. Typické napětí článku je 3,6 V a nabíjecí profil je stejný jako pro baterie Li-Ion – předběžná stabilizace, konstantní proud a konstantní napětí. Pro větší životnost baterie se volí spíše nižší hladiny maximálních nabíjecích napětí. [16] [17]

Solární panel má jedinečný bod na křivce V-I nebo V-P, nazývaný bod maximálního výkonu (MPP), ve kterém fotovoltaický systém pracuje s maximální účinností a produkuje maximální možný výkon. Algoritmus konstantního napětí je nejjednodušší metodou sledování bodu maximálního výkonu (MPPT). Maximálního výkonu je dosaženo snížením dobíjecího proudu. Pokud solární panel není schopen poskytnout celkový výkon, tak vstupní napětí na dobíječi poklesne, což může vést k ukončení nabíjení.

Když napětí na pinu MPPSET klesne pod hranici 1,2 V, tak se obvod snaží udržet hodnotu vstupního napětí tak, že sníží dobíjecí proud. Pokud snížení dobíjecího proudu nepomohlo a MPPSET pin je stále pod hranicí 1,2 V, tak obvod zůstává ve vstupní regulační smyčce a dobíjecí proud je nulový. Všechny stavy dobíječe jsou signalizovány pomocí pinů STAT1 a STAT2. Napětí na pinu MPPSET je regulováno na 1,2 V a podle následujícího vzorce lze vypočítat hodnoty rezistorů napětového děliče.

$$V_{MPPSET} = 1,2 \text{ V} \cdot \left(1 + \frac{R_{17}}{R_{19}}\right) \quad (3.3)$$

Kde R_{17} je hodnota odporu rezistoru připojeného mezi VIN a MPPSET a R_{19} je hodnota odporu rezistoru připojeného z MPPSET ke GND.

$$V_{MPPSET} = 1,2 \text{ V} \cdot \left(1 + \frac{499 \text{ k}\Omega}{36 \text{ k}\Omega}\right) = 17,83 \text{ V} \quad (3.4)$$

MPPSET pin slouží také k povolení nabíjení. Pokud je pod hranicí 75 mV, dobíjení je vypnuto. Nabíjení je povoleno, pokud napětí na pinu MPPSET je nad hranicí 175 mV. Dobíjecí proud je snímán odporem R_6 připojeným k pinům SRP a SRN. Nabíjecí proud je nastavitelný pomocí tohoto rezistoru. Rozlišení v celém měřicím rozsahu při měření napětí mezi SRP a SRN je fixně 40 mV, což znamená, že pro snímací rezistor s odporem 20 m Ω je dobíjecí proud 2 A viz následující vzorec:

$$I_{CHARGE} = \left(\frac{40 \text{ mV}}{R_6}\right) \quad (3.5)$$

$$I_{CHARGE} = \left(\frac{40 \text{ mV}}{20 \text{ m}\Omega}\right) = 2 \text{ A} \quad (3.6)$$

Když je při zapnutí nabíjení napětí na baterii pod hranicí 1,5 V, tak obvod detekuje vysoce vybitou baterii a snaží se ji „oživit“ předbíjecím (precharge) proudem, který je 1/10 nabíjecího

proudu. Pokud po 30 minutách (fixní) nepřekročí hranici 1,5 V, vyhodnotí obvod dobíjení jako chybné (FAULT na status pinech) a vypne se.

$$I_{PRECHARGE} = \left(\frac{4 \text{ mV}}{R_6} \right) \quad (3.7)$$

$$I_{PRECHARGE} = \left(\frac{4 \text{ mV}}{20 \text{ m}\Omega} \right) = 200 \text{ mA} \quad (3.8)$$

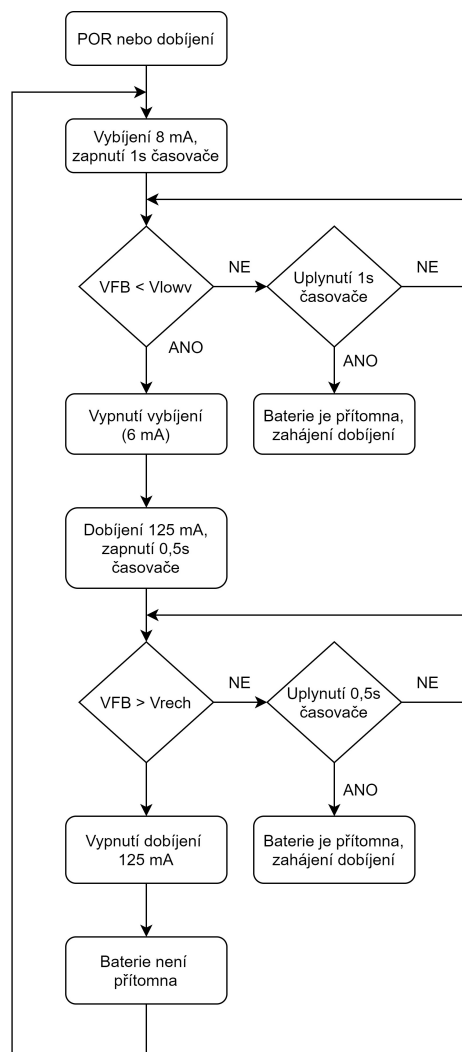
Ukončení nabíjení (charge termination) nastává, když je napětí na VFB pinu větší než 50 mV a dobíjecí proud je menší než ITERM hodnota (1/10 max. nabíjecího proudu).

$$I_{TERM} = \left(\frac{4 \text{ mV}}{R_6} \right) \quad (3.9)$$

$$I_{TERM} = \left(\frac{4 \text{ mV}}{20 \text{ m}\Omega} \right) = 200 \text{ mA} \quad (3.10)$$

Funkcionalitu ukončení nabíjení lze deaktivovat připojením pinu TERM_EN k logické nule, pro povolení je nutné pin TERM_EN připojit k napětí > 1,6 V. Obvod BQ24650 je schopen rozpoznat, zda je napájen ze vstupního zdroje napětí nebo z baterie. V případě, že nedobíjí a obvod je napájen z baterie, tak přechází do tzv. „sleep“ módu, aby nevybíjel baterii. Algoritmus detekce baterie zobrazuje obrázek 3.3 a dobíjecí algoritmus je zobrazen na obrázku 3.4. Splnění podmínek před zahájením nabíjení:

- Nabíjení je povoleno – MPPSET > 175 mV
- Napájecí napětí je nad minimální úrovní
- Zařízení není ve SLEEP módu — VCC > SRN
- VCC < VACOV (AC overvoltage threshold)
- 30 ms prodleva po zapnutí
- REGN LDO a VREF LDO napětí jsou korektní
- Není aktivní thermal shutdown
- TS fault není aktivní



Obrázek 3.3: Schéma algoritmu detekce baterie

Důvody zastavení nabíjení:

- Dobíjení je zakázáno – $MPPSET < 75 \text{ mV}$
- Vstupní napájecí adaptér (solární panel) je odpojen, dobíječ přechází do SLEEP módu
- Vstupní napájecí napětí je nižší než napětí baterie
- Vstupní napájecí napětí je vyšší než maximálně přípustné napětí
- REGN a VREF LDO mají jiné napěťové hladiny, než by měly mít
- TSHUT IC teplotní omezení — vysoká teplota na termistoru
- TS napětí je mimo „teplotní okno“

Dobíječ má automatický interní soft-start, který obstarává jemný náběh dobíjecího proudu, aby nebyly zbytečně zatěžovány výstupní kondenzátory nebo aby nedošlo k překmitu nastavených hodnot. Tento soft-start postupně zvyšuje nabíjecí proud po osmi rovnoměrně rozdělených krocích až do nastaveného maximálního nabíjecího proudu. Každý krok trvá přibližně 1,6 ms a typická doba náběhu je okolo 13 ms. Pro zajištění této funkce nejsou potřeba žádné externí komponenty. Synchronní PWM měnič má fixně nastavenou frekvenci a výstupní LC filtr musí být zvolen tak, aby rezonanční frekvence byla v rozmezí 12-17 kHz. Rezonanční frekvence je dána vztahem:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0}} \quad (3.11)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{10 \cdot 10^{-6} \cdot 11 \cdot 10^{-6}}} = 15,175 \text{ kHz} \quad (3.12)$$

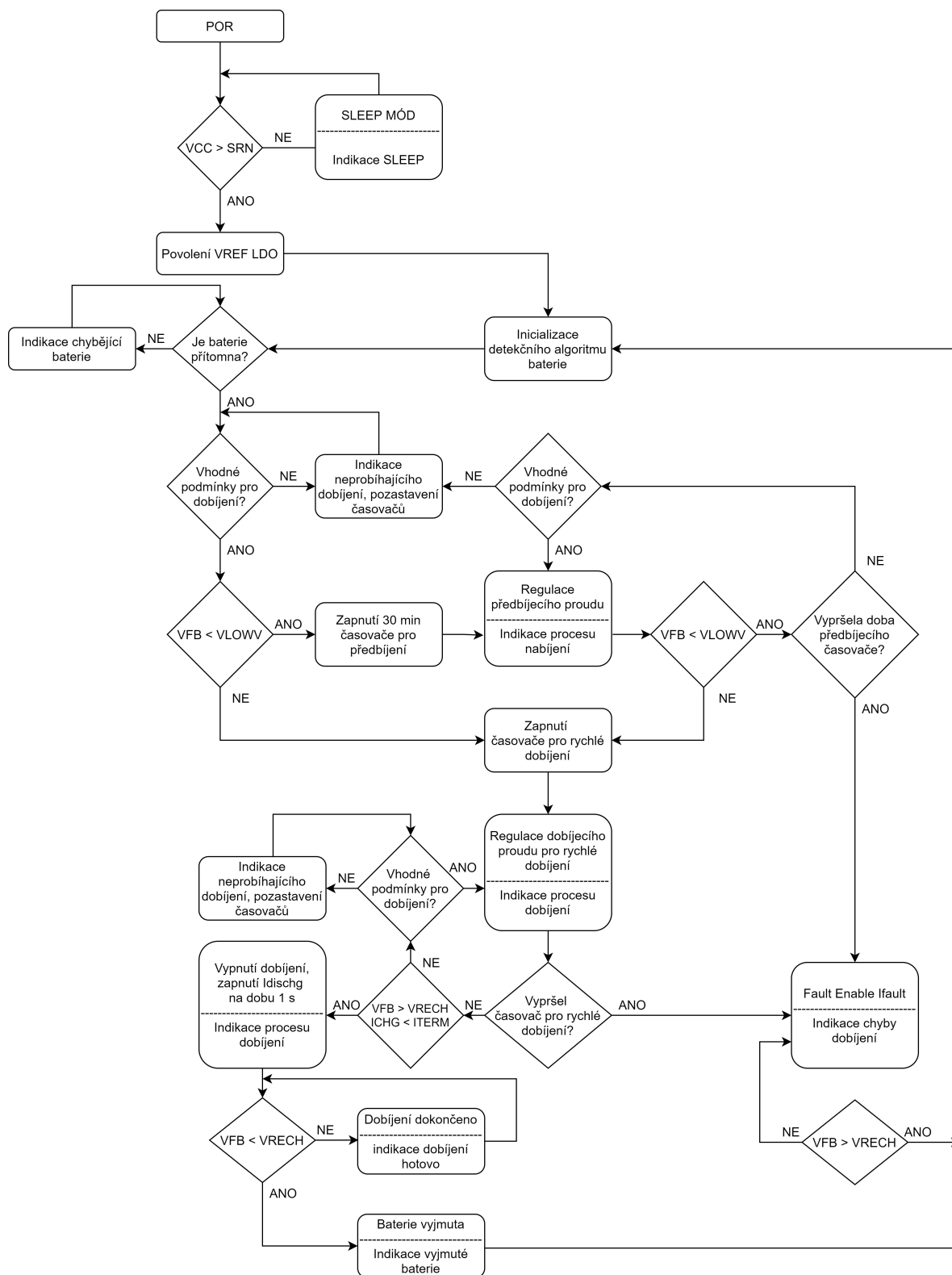
Tabulka 3.1: Doporučené hodnoty LC filtrů pro různé nabíjecí proudy

Nabíjecí proud	0,5 A	1 A	2 A	4 A	8 A	10 A
Výstupní cívka	22 μ H	15 μ H	10 μ H	6,8 μ H	3,3 μ H	3,3 μ H
Výstupní kondenzátor	7 μ F	10 μ F	15 μ F	20 μ F	40 μ F	40 μ F
Snímací odpor	80 m Ω	40 m Ω	20 m Ω	10 m Ω	5 m Ω	4 m Ω

Tabulka 3.2: Definice status pinů

Status nabíjení	STAT1	STAT2
Nabíjení probíhá	ON	OFF
Nabíjení dokončeno	OFF	ON
Nabíjení pozastaveno, přepětí, sleep mód, chybějící baterie	OFF	OFF

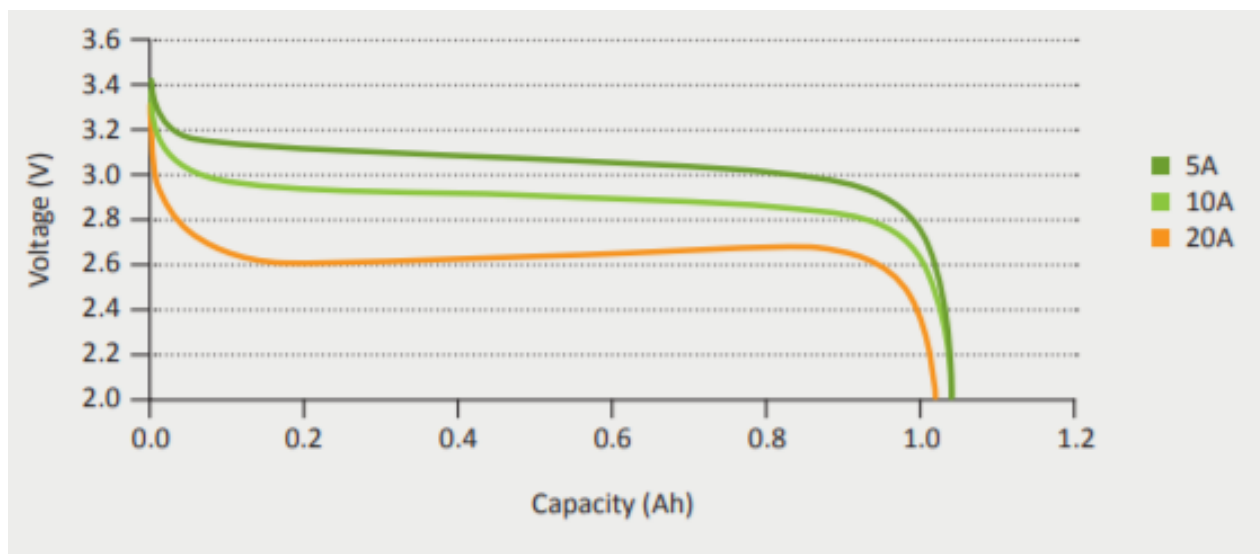
Součástí interních ochran je i ochrana proti přepětí na baterii. Pokud není napětí na baterii pod 102 % nastaveného dobíjecího napětí, tak je „high-side“ MOSFET vypnutý. Toto může nastat např. při odpojení zátěže nebo baterie. Dále je zde i nadproudová ochrana, která vybaví při dvojnásobku dobíjecího proudu a je automaticky zresetována, pokud proudový odběr klesne zpět na korektní hodnotu. Další ochranou je teplotní ochrana TSHUT, která vybaví při 145 °C a nedovolí obvodu dobíjet, dokud není teplota obvodu nižší než 130 °C. Teplota baterie je sledována za pomoci NTC čidla na pinu TS a obvod dobíječe ji porovnává s prahovými hodnotami, aby zjistil, zda může dobíjet. Pokud je teplota baterie mimo „teplotní okno“, je dobíjení pozastaveno, dokud nebude teplota v daných mezích. Podrobnosti o nastavení teplotního okna jsou k dispozici v datasheetu. Důležité je i dodržet maximální možnou hodnotu výstupní kapacity, aby při připojení nedocházelo k velkému úbytku napětí kvůli velkému proudovému odběru a falešnému vybavování ochran. Dále je nutné volit vhodný materiál dielektrika (X7R a X5R) kondenzátorů. Pro tuto aplikaci bylo využito doporučení výrobce a výsledné řešení je funkční.[14]



Obrázek 3.4: Schéma algoritmu dobíjecího obvodu

3.1.2 Napěťová ochrana

Pro všechny druhy baterií je z pohledu životnosti nejhorší špatné provozování. Špatným provozem je myšleno především nadměrné vybíjení popř. přebíjení. Při normálním provozu jsou LiFePO₄ baterie schopny garantovat téměř stejné parametry i po několika tisících cyklech. Pro každý druh baterie jsou rozdílné napěťové hladiny, při kterých je baterie vhodně provozována. V návrhu jsou použity LiFePO₄ baterie, které mají nominální hodnotu napětí 3,3 V. Doporučené dobíjecí napětí je 3,6 V a při 2 V je baterie zničena. Tento konkrétní typ nemá smysl zatěžovat pod hranici 2,5 V, protože zbývající kapacita mezi od této hranice po 2 V je minimální. Vybíjecí charakteristika LiFePO₄ baterie je znázorněna na obrázku 3.5. Aby nedošlo k nadměrnému zatěžování z hlediska minimálního napětí na článku, byl návrh dobíječe doplněn o napěťovou ochranu, která odpojí baterii už při 2,8 V na některém z článků. Maximální napětí by bylo možné překročit pouze špatným nastavením odporového děliče na výstupu dobíječe.[16]



Obrázek 3.5: Vybíjecí charakteristika LiFePO₄ baterie [16]

3.1.2.1 BQ296107

Pro ochranu baterie proti přepětí a nízkému napětí na jednotlivých článcích bylo využito ochranného obvodu BQ296107. Tato řada obvodů od Texas Instruments slouží jak první část primární ochrany bateriových článků. Jedná se o velmi přesné obvody, které slouží jako ochrana proti přepětí na článku s přesností měření 10 mV. Výstupní regulovaný pin tohoto obvodu byl v návrhu využit jako regulovaný zdroj napětí pro komparátor. Tento výstup je však proudově limitován pouze na 2 mA, což je pro napájení komparátoru dostačující. Každý článek je individuálně monitorován, zda nepřesáhl horní nebo spodní hranici napětí. Pokud je alespoň na jednom článku přepětí, je spuštěn interní časovač (není nastavitelný) a po uplynutí dané doby (a pokud je na daném článku

stále přepětí) je celý bateriový pack odpojen od dobíječe a zátěže. V případě odpojení bateriového packu z důvodu nízkého napětí je odpojen i regulovaný výstup, aby dále zbytečně nevybíjel baterii. Prahové hodnoty pro podpětí a přepětí nejsou bohužel uživatelsky konfigurovatelné, ale jsou dány výrobcem ochrany. Konkrétní parametry jsou pro každý ochranný obvod rozdílné a uživatel si může vybrat konkrétní obvod s nejlepšími parametry pro jeho aplikaci. V tomto návrhu byl zvolen obvod BQ296107, který má přepětovou ochranu nastavenou na 4,5 V, nízkonapětovou ochranu na 2,8 V a interní časovač je nastaven na 6,5 s. V tomto zapojení by napětí na článku nemělo přesáhnout 3,6 V, protože je tato hodnota pevně nastavena na dobíječi. Horší případ by byl, kdyby se baterie nadměrně vybila, a proto byl volen obvod, který vypíná s dostatečnou rezervou. Hodnoty externích součástek jsou dány výrobcem a kromě vstupních RC filtrů není potřeba speciálního umístění na DPS.[18] Stručný popis jednotlivých pinů obvodu ochrany je součástí příloh (složka Obvody).

3.1.3 Nadproudová ochrana

Pro napájení komunikační brány byly použity LiFePO₄ baterie, které jsou schopny vyvinout zkratový proud až 30 A. Pokud by takový proud procházel elektronikou komunikační brány, došlo by k jejímu nenávratnému poškození a v horším případě až k požáru. Při normálním provozu je maximální spotřeba komunikační brány ve stovkách mA, a proto je nutné zkratový stav hlídat. K takovému stavu by mohlo dojít v případě průniku kapalin do krabičky a za tímto účelem byla elektronika opatřena nadproudovou ochranou v podobě nastavitelného proudového komparátoru.

3.1.3.1 INA300

Jedná se o komparátor, který slouží k odpojení baterie při nadproudu (zkrat, příliš velké zatěžování baterie). Výrobcem tohoto obvodu je rovněž Texas Instruments a jedná se o komparátor pro automotive aplikace, který pomocí snímacího rezistoru (napětí na tomto rezistoru) určuje velikost proudu odebíraného z baterie. Velkou výhodou tohoto obvodu je nastavitelný práh, při kterém ochrana vybaví a možnost výběru ze tří rychlostí vybavení ochrany. Prah je nastavován pouze jedním rezistorem, výpočet hodnoty elektrického odporu tohoto rezistoru je dán vzorcem:[19]

$$R_{limit} = \frac{(I_{lim} \cdot R_{sense})}{20 \mu A} \quad (3.13)$$

Kde I_{lim} je limitní proud, při kterém ochrana vybaví a R_{sense} je odpor snímacího rezistoru. Dosazením dostaneme hodnotu referenčního odporu rezistoru R_{limit} .

$$R_{limit} = \frac{(3 A \cdot 0,002 \Omega)}{20 \mu A} = 300 \Omega \quad (3.14)$$

Další volitelnou hodnotou u této ochrany je možnost volby rychlosti vybavení resp. zpoždění vybavení ochrany. Pro tento konkrétní obvod je zpoždění 10, 50 nebo 100 μs . V této aplikaci byla volena „zlatá střední cesta“ 50 μs připojením DELAY pinu ke GND. Toto zpoždění je vhodné pro

případ proudových špiček anebo šumu, které by mohly vyvolávat falešné nadproudové stavy. Popis vstupně/výstupních pinů nadproudové ochrany je součástí příloh (složka Obvody).

3.1.4 Balancování

Komunikační brána obsahuje výpočetní modul, který ke svému napájení potřebuje napětí vyšší, než je napětí samotného článku. V praxi je možné využít „step-up“ nebo „step-down“ měnič, abychom dosáhli požadovaného napětí. U „step-up“ měničů dochází k transformaci z menšího napětí na vyšší, avšak proudové nároky jsou vyšší. Vhodnější variantou je „step-down“ měnič, kde je nutné sériově spojení bateriových článků, ale proudové nároky jsou nižší a pokrytí proudových špiček nebývá problémem. V návrhu byla volena možnost „step-down“ měniče s dvěma sériově spojenými články. Toto řešení má své nevýhody, které je nutné vzít v úvahu. U sériově spojených článků dochází k součtu jejich napětí a protéká jimi stejný proud. Při nabíjení a vybíjení však může docházet k jejich rozbalancování (různé napětí) a to z důvodu nedokonalosti ve výrobě, kdy není nikdy zaručeno, že tyto články mají stejné parametry. Články s horšími parametry jsou více namáhány a tím klesá i jejich životnost. Jelikož při nabíjení jsou sériově spojené články dobíjeny stejným proudem, může dojít k tomu, že jeden článek je dobíjen do maximální kapacity a druhý článek může být dobit jen částečně. Při vybíjení dochází k opačnému jevu, kdy jeden článek může být vybíjen na minimální možnou hranici a druhý článek je ještě částečně nabitý. Z toho plyne, že množství elektrického náboje dodaného z baterie je omezeno článkem s aktuálně nejmenším uchovaným nábojem. Pro využití celé kapacity baterie je nutné zajistit, aby se náboj dostal do všech článků, i přestože je jeden článek nabitý. Proto bylo využito balancovacího obvodu BQ29209, který porovnává napětí mezi články a balancovacím proudem se snaží napětí vyrovnat.[20]

3.1.4.1 BQ29209

Tento obvod slouží jako sekundární ochrana pro baterie, která v sobě zahrnuje přepětovou ochranu pro maximálně dva lithiové články a zajišťuje balancování. Obvod BQ29209 je velmi přesný, co se týče měření napětí článků a balancování. Napětí každého článku je porovnáváno s interní napětovou referencí a pokud obvod detekuje přepětí, spustí se časovač (nastavitelný), a po uplynutí dané doby odpojí baterii od systému. Přepětí by mohlo nastat pouze v případě špatně nastaveného děliče na dobíječi, jinak by tento stav neměl nikdy nastat. Tato přepětová ochrana nebyla využita, protože je již implementována pomocí obvodu BQ296107, který navíc hlídá i vybití. Obvod byl tedy využit pouze pro balancování článků. Automatické balancování je aktivní, pokud je napětí jednotlivých článků rozdílné o 30 mV nebo více a je ukončeno, pokud je rozdíl napětí mezi články roven 0 mV. Když je balancování povoleno, probíhá měření napětí na obou článcích a ten, který má vyšší napětí je obvodem zatěžován. Tento článek s vyšším napětím se tedy stává zdrojem balancovacího proudu až do 15 mA (nominální) řízeného balancovacím obvodem. Automatické balancování je možné de-

aktivovat, ale v návrhu je permanentně povoleno. Balancovací proudy jsou nastavitelné a jejich výpočet zobrazují následující vzorce:[21]

$$I_{CB1} = \frac{V_{CELL1}}{R_{CBext} + R_{CB1int}} \quad (3.15)$$

Kde V_{CELL1} je nominální napětí článku, R_{CBext} je hodnota odporu rezistoru mezi pinem VC1_CB a středním bodem baterie a R_{CB1int} je hodnota odporu vnitřního rezistoru. Dosazením do vzorce získáme nominální balancovací proud pro první (spodní) článek:

$$I_{CB1} = \frac{3,3 \text{ V}}{100 \text{ } \Omega + 300 \text{ } \Omega} = 8,25 \text{ mA} \quad (3.16)$$

Pro druhý (horní) článek je vzorec podobný, nicméně je nutné počítat i s hodnotou odporu rezistoru připojeného k napájecímu pinu:

$$I_{CB2} = \frac{V_{CELL2}}{R_{CBext} + R_{CB2int} + R_{VDD}} \quad (3.17)$$

Kde V_{CELL2} je nominální napětí článku, R_{CBext} je hodnota odporu rezistoru mezi pinem VC1_CB a středním bodem baterie, R_{CB2int} je hodnota odporu vnitřního rezistoru a R_{VDD} je hodnota odporu rezistoru připojeného k napájecímu pinu VDD. Dosazením do vzorce získáme nominální balancovací proud pro druhý článek:

$$I_{CB2} = \frac{3,3 \text{ V}}{100 \text{ } \Omega + 235 \text{ } \Omega + 100 \text{ } \Omega} = 7,59 \text{ mA} \quad (3.18)$$

3.1.5 Monitoring baterie

Při dobíjení a vybíjení baterie dochází ke změnám napětí na člancích a toto napětí může být ukazatelem stavu baterie. Nicméně se nejedná o přesné definování zbývajících kapacity, ale o hrubý odhad, který může být pro některé aplikace dostačující. To ovšem neplatí pro použitou chemii baterie, kterou obsahuje komunikační brána. LiFePO₄ baterie mají velmi plochou napěťovou charakteristiku a až do 3/4 kapacity mají téměř stejné napětí. Proto jednoduchý odhad stavu baterie měřením napětí není vhodný. Z tohoto důvodu je nutné využití monitorovacího obvodu, který má implementovaný Coulombův čítač, který pomocí úbytku napětí na snímacím rezistoru počítá množství náboje dodaného do nebo z baterie, a díky tomu je odhad stavu baterie velmi přesný. Tyto obvody jsou ve většině případů opatřeny i nějakým algoritmem, který je schopen s každým nabíjecím cyklem upřesňovat parametry baterie a reportovat její současný stav přes určitou sběrnici a komunikační protokol.

3.1.5.1 MAX17261

Tento monitorovací obvod patří do kategorie „ultra-low power“ a slouží k reportování stavu baterie díky implementovanému algoritmu ModelGauge m5. Tento algoritmus usnadňuje implementaci tím, že eliminuje požadavky na charakterizaci baterie a tím zjednodušuje interakci se softwarem. Je možné jej použít pro většinu aplikací s lithiovými bateriemi. Algoritmus dále kombinuje krátkodobou přesnost a linearitu Coulombova čítače s dlouhodobou stabilitou založeného na měření napětí spolu s teplotní kompenzací, která zajišťuje špičkovou přesnost. MAX17261 automaticky kompenzuje stárnutí článků, teplotu a poskytuje přesný stav nabití (State Of Charge) a zbývající kapacitu v mAh. Jakmile se baterie přiblíží kritické oblasti vybití, algoritmus vyvolá speciální kompenzaci, která eliminuje jakoukoli chybu a poskytuje tři metody hlášení stáří baterie (snížená kapacita, zvýšení odporu baterie a počet cyklů). Dále umožňuje přesné měření proudu, napětí a teploty. Teplota baterie se měří pomocí interního nebo externího NTC termistoru. Komunikace s dalším zařízením probíhá pomocí rozhraní I²C, které poskytuje přístup k datovým a řídicím registrům.[22][23] Stručný popis jednotlivých pinů obvodu je opět součástí příloh (složka Obvody).

Jádrem algoritmu ModelGauge m5 je směšovací algoritmus, který nepřetržitě kombinuje odhad výdrže na základě napětí a Coulombova čítače. Na rozdíl od klasických Coulombových čítačů, které po restartu ztrácí informace o stavu baterie, ModelGauge m5 nejprve využívá měření napětí na baterii, aby odhadl, v jakém stavu se baterie nachází. Postupem času, a tím, jak baterie prochází cykly, se zlepšuje přesnost Coulombova čítače a směšovací algoritmus mění váhu tak, že Coulombův čítač je dominantní při určování stavu baterie. Výstup z tohoto algoritmu netrpí akumulacním driftem z chyby offsetu při měření proudu a je stabilnější než běžná OCV (Open Circuit Voltage) metoda. MAX17261 pravidelně provádí vnitřní úpravy charakterizace baterie, aby odstranil počáteční chyby a udržel přesnost i přes to, že baterie stárne. Jedná se o drobné korekce, které zabráňují nestabilitě procesu učení při skokovým změnám na výstupu. Učení je plně automatické bez jakéhokoli zásahu.[24][23][22]

Klasické obvody pro monitorování baterie mají vynikající linearitu a krátkodobé vlastnosti. Trpí však driftem v důsledku akumulace chyby offsetu při měření proudu. Tato chyba je většinou velmi malá, ale nelze ji eliminovat. To způsobuje chybu hlášené kapacity, která se postupem času zvyšuje, a to vyžaduje pravidelné zásahy (korekce). Tyto korekce se dělají buď při vybité nebo plně nabitě baterii. Tento obvod implementuje pokročilé metody (z několika metod využívá jejich kladných vlastností), které odhadují napětí na prázdko, a to i během proudového odběru, a simuluje nelineární vnitřní dynamiku baterie pro stanovení zbývající kapacity se zvýšenou přesností a dále zohledňuje časové účinky chemických reakcí a impedancí v baterii. Odhad zbývající kapacity u tohoto obvodu neshromažďuje chybu offsetu v průběhu času. Dále tento algoritmus kompenzuje vlivy teploty a připojené zátěže. Dlouhodobá přesnost je zaručena tak, že se tento obvod neustále „učí“ a postupně si aktualizuje naučené parametry o baterii. Informace o stavu baterie jsou dostupné ve výstupních registrech.[22][23]

Tabulka 3.3: Rozlišení jednotlivých druhů registrů

Typ registru	LSb	Min hodnota	Max hodnota	Poznámky
Capacity	$5,0 \mu\text{Vh}/R_{\text{SENSE}}$	$0,0 \mu\text{Vh}$	$327,675 \mu\text{Vh}/R_{\text{SENSE}}$	Odpovídá 0,5 mAh s 10mΩ snímacím rezistorem
Percentage	1/256 %	0,0 %	255,9961 %	1% LSb při čtení pouze upper bytu
Voltage	$78,125 \mu\text{V}$	0,0 V	5,11992 V	Na základě počtu článků
Current	$1,5625 \mu\text{V}/R_{\text{SENSE}}$	$-51,2 \text{ mV}/R_{\text{SENSE}}$	$51,1984 \text{ mV}/R_{\text{SENSE}}$	Dvojkový doplněk odpovídá 156,25 μA s 10mΩ snímacím rezistorem
Temperature	1/256 °C	-128 °C	127,996 °C	Dvojkový doplněk 1 °C LSb při čtení pouze upper bytu
Resistance	1/4096 Ω	0,0 Ω	15,99976 Ω	
Time	5,625 s	0,0 s	102,3984 h	
Special				Formát definovaný u popisu registru

ModelGauge m5 algoritmus používá veškeré informace o baterii (teplota, věk, proud) k určení zbývajících kapacity a když se baterie blíží k hranici vybití, vyvolá se speciální mechanismus pro opravu chyb, který eliminuje jakoukoli chybu. Následující výstupní registry informují o stavu baterie a jsou přístupné 351 ms po zapnutí nebo nakonfigurování obvodu.

Tabulka 3.4: Volba snímacího odporu v závislosti na kapacitě baterie a dobíjecím proudem

Kapacita baterie (mAh)	Snímací odpor (mΩ)	Rozlišení registru (μA)	Rozsah proudu (A)	Rozlišení registru (mAh)
>4000	1	1562,5	± 51,2	5
>2000	2	781,25	± 25,6	2,5
>800	5	312,5	± 10,24	1
>400	10	156,25	± 5,12	0,5
>200	20	78,125	± 2,56	0,25
>80	50	31,25	± 1,024	0,1

3.1.6 Testování funkčnosti

Za účelem kontroly funkčnosti a diagnostiky bylo žádoucí vyzkoušet navržený dobíječ ještě před připojením ke komunikační bráně. Nejdůležitějšími parametry jsou nastavení MPP bodu zdroje a dobíjecí napětí, které je nastavitelné skrze výstupní dělič napětí. V návrhu má dobíječ nastaven

bod MPP na 17,8 V, maximální dobíjecí proud na 2 A a výstupní napětí přibližně na 7,2 V. K otestování funkčnosti je zapotřebí stejnosměrný zdroj napětí (nejlépe 30V) s proudovým omezením na 3 A, programovatelná elektrická zátěž, dva voltmetry a ampérmetry s vhodnými rozsahy. Postup nastavení laboratorního vybavení zobrazuje následující seznam:

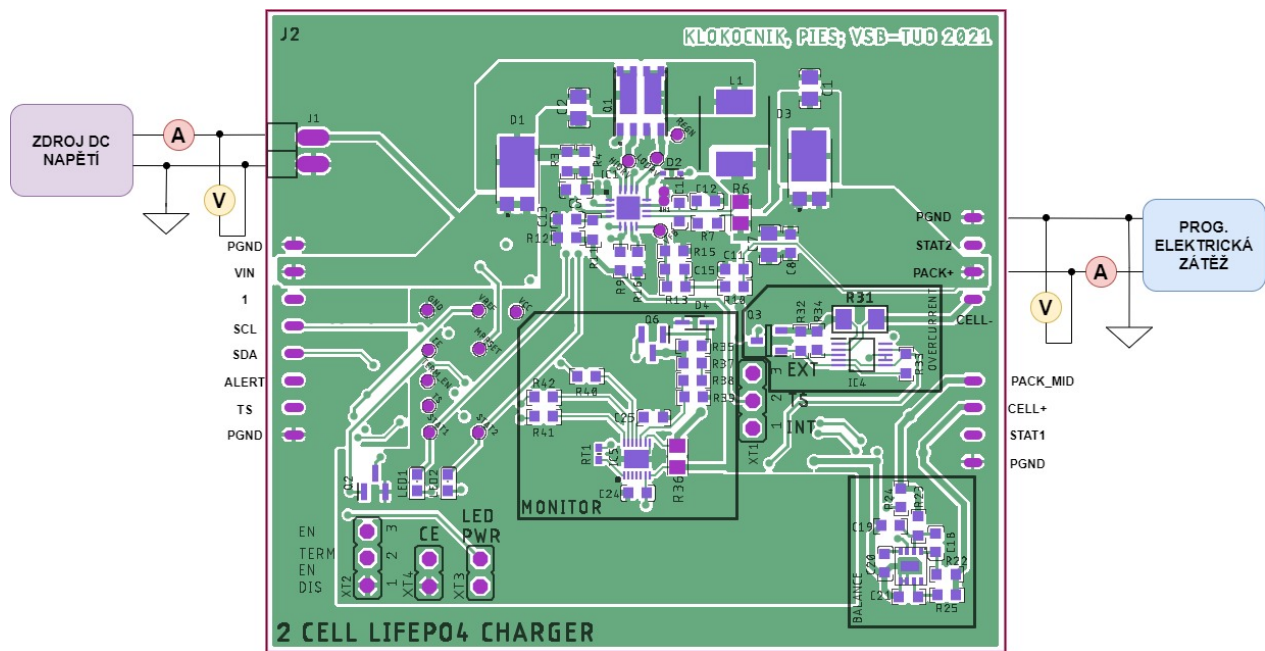
1. Zapnout napájecí zdroj a nastavit napětí na 21 V, dále nastavit proudové omezení na 2,5 A, poté zdroj vypnout.
2. Připojit výstup napájecího zdroje (kladná větev) sériově se vstupem ampérmetru, výstup ampérmetru propojit s pinem VIN nebo do svorkovnice J1. GND zdroje propojit s PGND desky dobíječe.
3. Připojit voltmetr na vstup dobíječe (mezi ampérmetr a vstup dobíječe).
4. Připojit zátěž spolu v sérii s ampérmetrem k výstupnímu pinu dobíječe PACK+ a k zemnicímu pinu PGND.
5. Připojit voltmetr k výstupnímu pinu PACK+ a PGND.
6. Korektně nastavit příslušné jumpery:
 - (a) XT1 – Interní měření teploty (pokud není připojen externí termistor).
 - (b) XT2 — Povolení/vypnutí automatického ukončení nabíjení – povolit.
 - (c) XT3 — LED power switch; zapnout aby byla signalizace viditelná.
 - (d) XT4 — CE (charger enable), povolení dobíjení.

Po takto nastaveném vybavení lze otestovat napětí na pinech VIN, PACK+, VREF a REGN pomocí voltmetru dle následujícího návodu:

1. Odpojit zátěž a zapnout zdroj napětí
2. Měření:
 - (a) Napětí na J2 (VIN) = $21\text{ V} \pm 500\text{ mV}$
 - (b) Napětí na J2 (PACK+) = $0\text{ V} \pm 500\text{ mV}$
 - (c) Napětí na TP (VREF) = $3,3\text{ V} \pm 200\text{ mV}$
 - (d) Napětí na TP (REGN) = $0\text{ V} \pm 200\text{ mV}$

Výše zmíněný test proběhl v pořádku a následovalo otestování detekce baterie a povolení nabíjení:

1. Připojení XT1 (Internal TS), propojení XT4 (CE – Charger Enable).



Obrázek 3.6: Zapojení modulu dobíječe pro otestování funkčnosti

2. Měření:

- (a) Napětí na TP (VREF) = $3,3 \text{ V} \pm 200 \text{ mV}$
- (b) Napětí na TP (REGN) = $6 \text{ V} \pm 200 \text{ mV}$

3. Sledování:

- (a) Napětí na J2 (PACK+) = $7,2 \text{ V} \pm 500 \text{ mV}$
- (b) STAT1 a STAT2 diody – obě diody vypnuty

Test detekce baterie a povolení nabíjení proběhl v pořádku a obvod dobíječe se prozatím chová tak jak by měl, tudíž mohla být otestována funkčnost regulace dobíjecího proudu:

1. Připojení zátěže, režim konstantního napětí (menší než nastavení výstupu dobíječe např. 5 V).

- (a) Měření proudu na výstupním pinu PACK+ (J2) = $0,2 \text{ A} \pm 100 \text{ mA}$
- (b) Sledování: STAT1 = ON, STAT2 = OFF

2. Zvýšení napětí na zátěži.

- (a) Měření proudu na PACK+ (J2) = $2 \text{ A} \pm 200 \text{ mA}$
- (b) Sledování: STAT1 = ON, STAT2 = OFF

3. Vypojení jumperu XT1.

(a) Měření proudu na PACK+ (J2) = 0 A \pm 100 mA

(b) Sledování: STAT1 = OFF, STAT2 = OFF

4. Připojení jumperu XT1 (Internal TS)

(a) Měření proudu na PACK+ (J2) = 2 A \pm 200 mA

(b) Sledování: STAT1 = ON, STAT2 = OFF

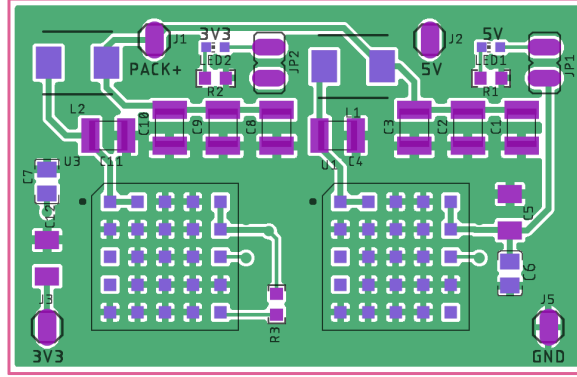
Dále byla vyzkoušena funkce ukončení nabíjení, pokud dobíjecí proud klesne pod 200 mA. Rovněž bylo ověřeno, že je korektně nastaven bod MPP a pod hranicí 17,8 V dobíječ nedobíjí. Lehce nad touto hranicí začíná obvod baterii dobíjet.

3.2 Modul zdroje napájení

Jednotlivé moduly, které komunikační brána obsahuje, vyžadují různá napájecí napětí. Výpočetní modul NanoPi Neo Core 2 ke své činnosti potřebuje 5V napájení. Dle doporučení výrobce je vhodné využít zdroj 5 V s proudem až 2 A. V normálním provozu je spotřeba daleko nižší a pohybuje se průměrně kolem hodnoty 150 mA. LTE modul vyžaduje napájení 3,0-3,6 V a je doporučeno využití zdroje 3,3 V a 3 A kvůli proudovým špičkám (až 2 A). V pohotovostním režimu je spotřeba LTE modulu 19 mA a v režimu vysílání je proudový odběr až několik stovek mA v závislosti na vybraném datovém přenosu. Řídicí modul Hardwario má rozsah napájecího napětí od 2,0-3,6 V a proudový odběr závisí na množství využitých periférií, řádově se jedná o desítky miliampér. Posledním modulem je transceiver IQRF, který ke své činnosti potřebuje napětí 3,1-5,3 V a maximální proudový odběr se pohybuje lehce přes 20 mA. Z tohoto vyplývá neoptimálnější řešení v podobě dvou DC/DC měničů pro 5V a 3,3V napájecí větev. Testování funkčnosti probíhalo tak, že na PACK+ a GND byl připojen zdroj napětí o nominální hodnotě napětí baterie a za pomoci programovatelné zátěže byly výstupy 3V3 a 5V zatěžovány proudem až 3 A. Výsledný vzhled DPS modulu zdroje je zobrazen na obrázku 3.7.

Piny zdroje:

- **PACK+** – Slouží k připojení chráněného výstupu z baterie.
- **GND** – Zemnicí pin.
- **3V3** – výstupní 3,3V napájecí pin.
- **5V** – Výstupní 5V napájecí pin.



Obrázek 3.7: Modul zdroje

3.2.1 RPM5.0-3.0

V návrhu byly zvoleny dva měniče RPM5.0-3.0 od firmy Recom Power, které mají nastavitelný napěťový výstup s proudovým odběrem až 3 A. Velkou výhodou tohoto měniče je minimální vstupní napětí, které je 5,15 V, pro výstupní napětí 5 V a proudový odběr až 3 A, což umožňuje provoz i při minimálním napětí baterie (5,6 V) v závislosti na použité ochraně baterie. Pokles napětí mezi vstupem a výstupem měniče je pro tuto aplikaci velice důležitý, protože baterie komunikační brány, která je zdrojem elektrické energie pro měnič, má ve vybitém stavu napětí blízké 5 V. Další nespornou výhodou je kovové stínění, které rovněž slouží k ochlazování měniče a zlepšuje EMC vlastnosti. Účinnost tohoto měniče se pohybuje od 90 % do 97 % v závislosti na vstupním napětí a zatěžováním výstupu. Maximální ztrátový výkon se pohybuje do 0,8 W. Měnič nabízí možnost „softstartu“ a propojení více měničů tak, aby se zapínali postupně, až je výstup na předchozím měniči ustálený. Další možností je zapínání jednotlivých měničů pomocí řídicího mikrokontroléru. Měnič má zabudovanou ochranu proti přehřátí, která jej vypne při 110 °C a při teplotě 100 °C jej opět zapne.[25]

Tyto měniče nabízí funkci ořezání výstupního napětí v rozsahu od 0,9 V do 6,0 V pomocí externích rezistorů. V tomto případě se jedná o měnič s výstupním napětím 5 V a pro napájení modulů je potřeba 3,3V napájecí větev, a proto potřebujeme napětí na výstupu zmenšit o 1,7 V. Výpočet „trimovacího“ odporu zobrazuje následující vzorec:

$$R_{down} = \left(\frac{(V_{out_{set}} - V_{ref}) \cdot R_3}{V_{out_{nom}} - V_{out_{set}}} \right) \quad (3.19)$$

Kde $V_{out_{set}}$ je hodnota napětí, o které potřebujeme ponížít výstup, V_{ref} je reference uvnitř obvodu a její hodnota je 0,81 V. Hodnota vnitřního odporu R_3 je dána typem měniče a je fixně nastavena na 431 kΩ, hodnota $V_{out_{nom}}$ je rovna nominálnímu výstupnímu napětí, které je v případě použitého měniče rovno 5 V.

$$R_{down} = \left(\frac{(1,7 - 0,81) \cdot 431\,000}{5 - 1,7} \right) = 116\,239,4\,\Omega \quad (3.20)$$

Při výrobě součástek však dochází k výrobním odchylkám a měřením byl vyhodnocen nejbližší vhodný odpor rezistoru z řady E96 na 133 kΩ. Tímto bylo dosaženo výstupního napětí 3,33 V. Ostatní součástky byly přizpůsobeny dle doporučení výrobce, který při dodržení deklarovaných hodnot garantuje dobré vlastnosti.

3.3 Řídicí modul

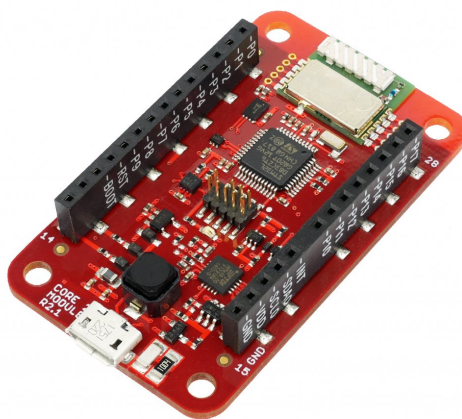
K realizaci řídicí části byl vybrán „ultra-low-power“ mikrokontrolér STM32L083CZ, který obsahuje všechny potřebné periferie a je předurčen k bateriovým (nízkoenergetickým) aplikacím. Vzhledem k nepříliš velkým zkušenostem s tímto obvodem a především ke zjednodušení prvotního návrhu komunikační brány bylo využito komerčního řešení od firmy Hardwario (dříve BigClown) v podobě Hardwario Core Modulu zobrazeného na obrázku 3.8, který je osazen totožným mikrokontrolérem a navíc zjednodušil návrh v tom, že byl již vytvořen LoRa modul, který lze ke Hardwario Core Modulu jednoduše připojit. Další výhodou je možnost využití vytvořené SDK knihovny a rozšíření Platformio do prostředí Visual Studio Code a díky interním RTC není potřeba dalšího externího obvodu. Tímto je i umožněno ladění pomocí USB kabelu připojeného k PC, nicméně pro ladění je na mikrokontroléru vyhrazena jedna komunikační UART linka, kterou už poté nelze použít. V případě nutnosti ladění je k dispozici i konektor pro SWD debugger.[26]

Hlavním úkolem tohoto modulu je především řízení napájení jednotlivých modulů, nastavení konfiguračních registrů monitorovacího obvodu (I²C), vyčítání informací o stavu baterie, řízení komunikace s LoRa modulem (UART), provozování hodin reálného času (RTC), propojení s FRAM pamětí (SPI) a případná komunikace s výpočetním modulem.

Parametry použitého modulu:

- ARM Cortex M0+ 32-bit MCU STM32L083CZ
- 192 kB Flash
- 20 kB RAM
- 3x UART, 2x I²C, 1x SPI, 5x ADC, 2x DAC
- 18x GPIO
- Spotřeba v režimu hluboký spánek: < 5μA

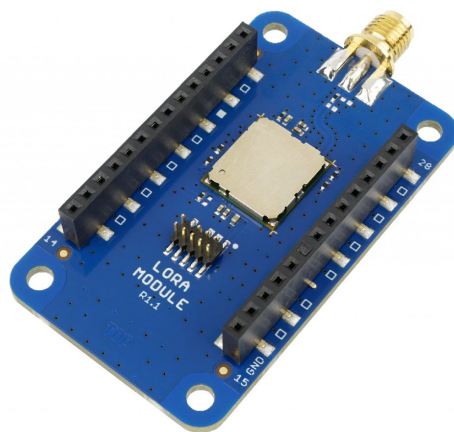
Ve schématu zapojení jsou k tomuto modulu připojeny pinové lišty, které umožňují jednoduché uživatelské přepojení pinů dle potřeby. Některé piny jsou však vyhrazeny pro ovládání napájení jednotlivých modulů, a tudíž je už nelze využít k jiné funkcionalitě. Rovněž komunikace s monitorovacím obvodem a s FRAM pamětí má vyhrazeny vlastní piny, které nelze jinak využít. Ovládání napájení k tomuto modulu je zajištěno pomocí jumperu JP8, kde při jeho odpojení dojde k vypnutí napájení modulu. Modul je možné napájet dvěma způsoby. Prvním způsobem je napájení z USB portu počítače a druhým způsobem lze modul napájet z 3,3V napájecí větve (zasunutý jumper na základní desce). Při napájení z obou zdrojů je upřednostňováno napájení z VDD pinu a napájení z USB portu je vypnuté, nicméně komunikace s počítačem nadále funguje.



Obrázek 3.8: Hardwario Core modul

3.4 LoRa Modul

Komunikaci pomocí technologie LoRa obstarává LoRa modul (obrázek 3.9), který lze připojit ke Core Modulu (řídící modul) od firmy Hardwario a díky zig-zag modulaci lze komunikovat v síti LoRaWAN až na několik desítek kilometrů mezi komunikačními bránami. Tento komunikační modul je osazen LoRaWAN modulem CMWX1ZZABZ-078 a komunikace probíhá pomocí UART sběrnice (AT příkazy). O zpracování příkazů a obsluhu RF části se stará mikrokontrolér na řídícím modulu, k tomuto účelu je zde vyhrazena UART1 komunikační linka. Ke komunikačnímu modulu lze připojit SMA anténu. Spotřeba tohoto modulu v pohotovostním režimu je $2\text{ }\mu\text{A}$, v přijímacím módu až $23,6\text{ mA}$ a při vysílání je proudový odběr maximálně 128 mA . [26] [27]

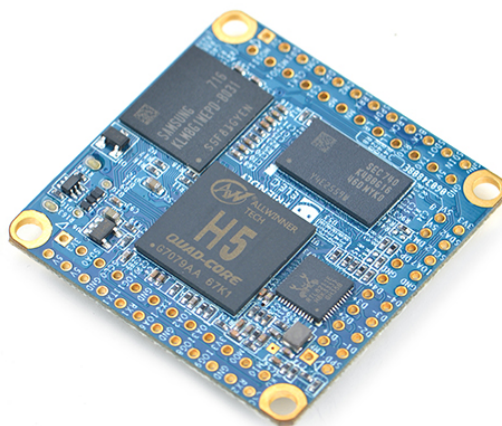


Obrázek 3.9: Hardwario LoRa modul

3.5 Výpočetní modul

Každá IQRf komunikační brána potřebuje ke své činnosti určitý softwarový balík (IQRf Gateway Daemon), díky kterého je možné komunikační bránu připojit do Internetu a cloudu. Tento Daemon využívá několik komunikačních kanálů (UDP, MQ, MQTT a WebSocket) a lze jej spravovat pomocí IQRf Gateway Webapp. Aby se jednalo o IQRf komunikační bránu, je nutné k výpočetnímu modulu připojit IQRf transceiver s hardwarovým profilem koordinátora sítě. Samotný software je bez vhodného hardwaru nepoužitelný, a proto je nutné komunikační bránu doplnit o jednodeskový mikropočítač založený na Linuxovém jádře. Obvykle k tomu slouží jednodeskové počítače typu Raspberry Pi, Up Board nebo BeagleBone. Tato komunikační brána je však napájena z baterie a je vyžadován co nejnížší proudový odběr, což je při použití výše zmíněných desek téměř nemožné. V rámci výběru vhodné desky proběhlo měření energetické náročnosti různých desek pomocí výkonového analyzátoru. Energetickou náročností je zde myšlen proudový odběr, který udává spotřebu zařízení a byl měřen u platforem BalenaFin, Raspberry Pi 3 Model B+, RoadRunner a NanoPi NEO Core 2 s operačním systémem Linux. Z analýzy naměřených dat vyplynulo, že nejvhodnějším kandidátem je NanoPi NEO Core 2, protože má přijatelnou průměrnou spotřebu okolo 150 mA a lze u něj softwarově vypnout nepotřebné periferie, čímž se spotřeba ještě sníží.

Jako výpočetní modul byla vybrána deska NanoPi NEO Core2 (obrázek 3.10), která je k základní desce připojena pomocí pinů a má stejný tvar jako předchozí verze. Tato deska je hodně podobná např. Raspberry Pi, ale je menší a výkonově lehce slabší. Osazena je 64bitovým 4jádrovým procesorem Allwinner H5, paměť RAM je volitelná (512 MB/1 GB) a má volitelnou eMMC paměť (defaultně 8 GB, alternativa k SSD, jednodušší typ paměti). Konektivita je zajištěna pomocí Ethernetového portu, USB konektoru a microSD slotu. Dále má tento výpočetní modul několik SPI, I²C, UART rozhraní a další. ESD ochrana a zajištění funkčnosti všech částí je řešeno na samotné desce, a proto není nutné něco přidávat. Lze na ni provozovat operační systém Ubuntu Core. Tento modul lze korektně vypínat pomocí OS nebo za pomoci Hardwaro modulu. Propojení s řídicím modulem je realizováno externě pomocí pinových lišt. Připojení do internetu je možné pomocí klasického LAN konektoru, popř. lze do jednoho ze 2 USB portů vložit USB WiFi modul. K tomuto modulu je fixně připojen LTE modul pomocí USB a UART rozhraní.



Obrázek 3.10: Výpočetní modul

3.6 IQRF modul

Spojení komunikační brány s IQRF MESH sítí je realizováno za pomoci speciálního modulu, tzv. „transceiveru“. Firma Microrisc v současné době nabízí čtyři druhy modulů TR-72D, TR-75D, TR-76D a TR-77D. Srovnání jednotlivých modulů zobrazuje tabulka 3.5. Jelikož při vývoji je důležité moduly jednoduše měnit, byla zvolena nejběžnější varianta TR-72D, která umožňuje snadné vyjmutí modulu ze SIM konektoru. Ve výsledné verzi komunikační brány bude pravděpodobně zvolen nejméně energeticky náročný modul, což je dle výrobce varianta TR-76D, která je na nízkoeenergetické aplikace nejvhodnější.

Zvolený modul TR-72D se vyrábí v 5 variantách. TR-72DA je nejzákladnější model, který poskytuje jen základní funkcionalitu a je stavebním kamenem pro další varianty. Další varianta TR-72DAT je obohacena o teplotní senzor, varianta TR-72DC je stejná jako základní varianta, nicméně nemá PCB anténu a je nutné ji připojit externě. Modul TR-72DCT rovněž vyžaduje připojení externí antény, ale navíc obsahuje teplotní senzor. Poslední nabízený modul je TR-72DCT-433 je výbavou totožný s předchozím modulem, ale jako jediný modul ze všech má nejvyšší vysílací výkon až 18 mW v pásmu 433 MHz, ostatní moduly jsou softwarově konfigurovatelné pro provoz v pásmu 868 MHz nebo 915 MHz.

V rámci testování funkčnosti brány byl dostačující nejzákladnější model TR-72DA (obrázek 3.11), který je k základní desce připojen pomocí SIM konektoru. O řízení napájení se stará řídicí

Tabulka 3.5: Srovnání základních parametrů různých druhů IQRF modulů[11]

	TR-72D	TR-75D	TR-76D	TR-77D
Vysílací výkon	10 mW	10 mW	10 mW	4 mW
Frek. pásmo	868/916 MHz	868/916 MHz	868/916 MHz	868 MHz
Počet I/O	6	9	11	11
Napájecí napětí	3,1-5,3 V	3,0-3,4 V	3,0-3,4 V	3,0-3,4 V
Proudový odběr Deep sleep	1,7 μ A	56 nA	56 nA	56 nA
Proudový odběr Sleep mode	2,3 μ A	610 nA	610 nA	610 nA
Proudový odběr Run mode - RF sleep	1,4 mA	1,6 mA	1,6 mA	1,6 mA
Proudový odběr Run mode - RF ready	2,8 mA	3,0 mA	3,0 mA	3,0 mA
Proudový odběr RX mode - STD	12,1 mA	11,8 mA	11,8 mA	11,8 mA
Proudový odběr RX mode - LP	260 μ A	250 μ A	250 μ A	250 μ A
Proudový odběr RX mode - XLP	18,5 μ A	16,3 μ A	16,3 μ A	16,3 μ A
Proudový odběr TX mode	8,3-25 mA	8,3-25 mA	8,3-25 mA	8,3-25 mA

modul, dále jsou v návrhu dle doporučení výrobce umístěny blokovací kondenzátory, které pokrývají proudové špičky. Modul je možné přibondovat do IQRF sítě jako klasický uzel, nicméně pro výslednou funkcionalitu brány se jedná o redundantní část, protože komunikační brána bude obsahovat pouze koordinátora sítě.



Obrázek 3.11: Zvolený IQRF modul[11]

3.7 LTE modul

Pro LTE technologii bylo využito IoT LTE modulu BG96MA (obrázek 3.12) od firmy Quectel, který je k základní desce připojen pomocí mPCIe socketu. Tento modul poskytuje datovou konektivitu v sítích LTE-FDD/LTE-TDD/GPRS/EGPRS s podporou polovičního duplexu. Probíhající komunikace je indikována pomocí LED. Tuto detekci lze rovněž vypnout odpojením propojovacího jumperu JP4 na základní desce, abychom šetřili baterii. O řízení napájení se stará Hardwario modul, komunikace s tímto modulem a výpočetním modulem je primárně řešena přes rozhraní USB. Restartování modulu (jumper JP3) a zapnutí režimu letadlo je možné manuálně pomocí jumperu JP2 umístěného na základní desce komunikační brány. Spotřeba tohoto modulu se liší v závislosti na nastavení vysílání, v nejhorším případě jsou proudové špičky při vysílání kolem 2,7 A, a proto je v blízkosti tohoto modulu (napájecí větev) umístěn vysokokapacitní kondenzátor, který tyto proudové špičky dokáže „pokrýt“. Konstantní proudový odběr v pohotovostním stavu je 19 mA, při vysílání v rámci LTE je odběr 278-326 mA. Při přenosu dat pomocí služby GPRS je proudový odběr od 298 mA do 854 mA a při EDGE technologii 219-563 mA v závislosti na vysílacím výkonu. Připojení SIM karty je nutné externě na základní desce, dále je nutné připojení externí antény k modulu.



Obrázek 3.12: LTE mPCIe modul BG96MA

3.8 Základní deska

Základní deska komunikační brány slouží k propojení všech dílčích částí. V návrhu desky bylo přihlíženo v co největší míře k variabilitě tak, aby bylo možné jednotlivé moduly uživatelsky přepojovat. První část schématu je věnována konektorům pro připojení baterie (držáku baterie), modulu dobíječe, modulu zdroje a napájecím obvodům. Dále se zde nachází redundantní napájecí pinové lišty, plošky pro připojení externí baterie a výstupní piny z dobíječe pro jednodušší sledování stavu nabíjení.

Druhá část schématu obsahuje patičky pro připojení řídicího modulu a další pinovou lištu pro jednodušší odposlouchávání pinů řídicího modulu. Další součástí je řízení napájení pro paměť FRAM o velikosti 1 Mb, která je zde umístěna pro případ nutnosti ukládání konfiguračních dat, popř. pro uložení dat získaných z IQMESH sítě. Hlavním důvodem použití této paměti je její energetická nenáročnost, která může být až 250krát nižší než u paměti typu FLASH. Dále se jedná o nevolatilní paměť s relativně rychlým zápisem a je určena i do náročnějších aplikací.

Třetí část je věnována pro uživatelská tlačítka, které jsou v návrhu z důvodu manuálního ovládní napájení jednotlivých modulů při vývoji softwaru. Konkrétně jsou tyto tlačítka přes pinovou lištu propojeny s řídicím modulem. Stisknutím některého z tlačítek dojde k uzemnění vstupního pinu řídicího modulu, který podle firmwaru vypne nebo zapne napájení pro daný modul. Jelikož zde dochází k přímému styku elektroniky a lidského těla, které může být nabito elektrostatickým nábojem, a tím může dojít k poškození některých částí, byly zde ke každému tlačítku umístěny ESD diody jako ochrany před tímto výbojem.

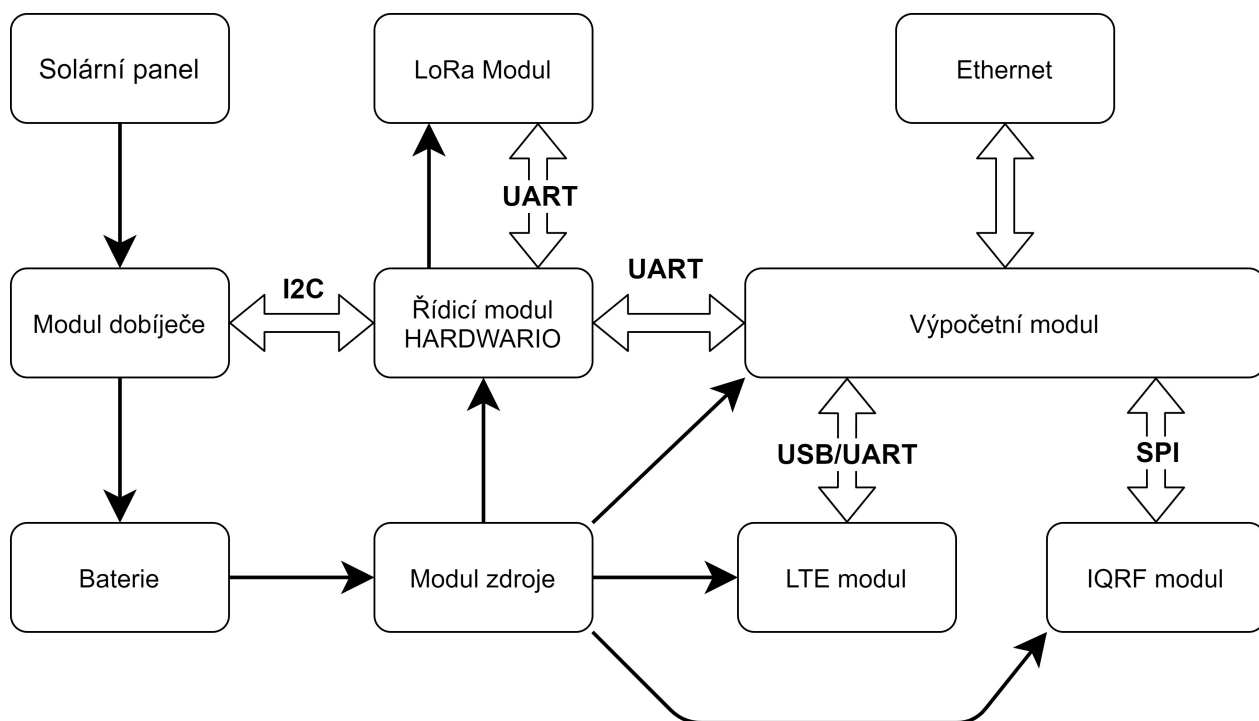
Další část se zabývá výpočetním modulem, konkrétně jeho připojením k základní desce pomocí propojovacích patiček. K tomuto modulu je primárně připojen LTE modul pomocí USB a záložně UART sběrnice a řídicí modul pomocí UART sběrnice. I²C sběrnice je zde připojena, nicméně je v konfiguračním souboru operačního systému zakázána, protože roli I²C mastera už obstarává řídicí modul. Dále jsou zde umístěny dva USB konektory pro připojení externích zařízení. K těmto konektorům jsou rovněž připojeny ESD ochrany. Ostatní části nevyžadují ESD ochrany, protože jsou již součástí modulu. Pro připojení do Internetu se zde nachází klasický RJ-45 konektor se zabudovanými LED, které indikují probíhající komunikaci.

Předposlední část schématu obsahuje mPCIe socket pro připojení LTE modulu, který je propojen s výpočetním modulem. Resetování, zapnutí napájení pro indikační LED a zapnutí režimu letadlo je možné propojením jumperů umístěných na základní desce. Řízení napájení je opět starostí řídicího modulu, v napájecí větvi před spínacím tranzistorem se nachází 1,5 mF superkondenzátor, který slouží k pokrytí proudových špiček při vysílání. V napájecí části za spínacím tranzistorem je umístěn další kondenzátor, který není osazen, protože je redundantní a byl zde umístěn pro případ nedostatečného náboje z prvního kondenzátoru. Kapacita kondenzátoru byla volena trojnásobná než je minimální doporučená od výrobce modulu. Z důvodu neosazenosti SIM konektoru na modulu byla volena možnost externího připojení SIM na základní desce. K tomuto konektoru byly

umístěny doporučené blokovací kondenzátory a ESD ochrana. Nepoužité piny jsou vyvedeny na pájecí plošky, které by v budoucnu mohly rozšířit funkcionalitu např. o detekci vložení SIM karty.

V poslední části je řešeno spínání napájení a připojení IQRF modulu k základní desce. Důležitou částí je odpojovací jumper JP6, který je nutné vypojit v případě výměny modulů. Při výměně modulu může totiž dojít ke zkratování některých kontaktů SIM konektoru a k destrukci samotného IQRF modulu. Bylo zde umístěno i bondovací tlačítko, které by mohlo sloužit pro připojení k vytvořené MESH síti, nicméně v IQRF modulu je nahrán hardwarový profil koordinátora sítě, který danou síť vytváří, a proto je toto tlačítko nadbytečné. Jelikož na předchozím listu schématu nebylo místo pro řešení spínání 5V napájecí větve výpočetního modulu, bylo toto řešení umístěno na tento poslední list.

Na následujícím obrázku 3.13 lze vidět zjednodušené blokové schéma IQRF komunikační brány s vyznačením směru toku elektrické energie a komunikačních sběrnic mezi jednotlivými moduly. Elektrické schéma bylo navrženo v CAD programu Autodesk Eagle 9.6.2.

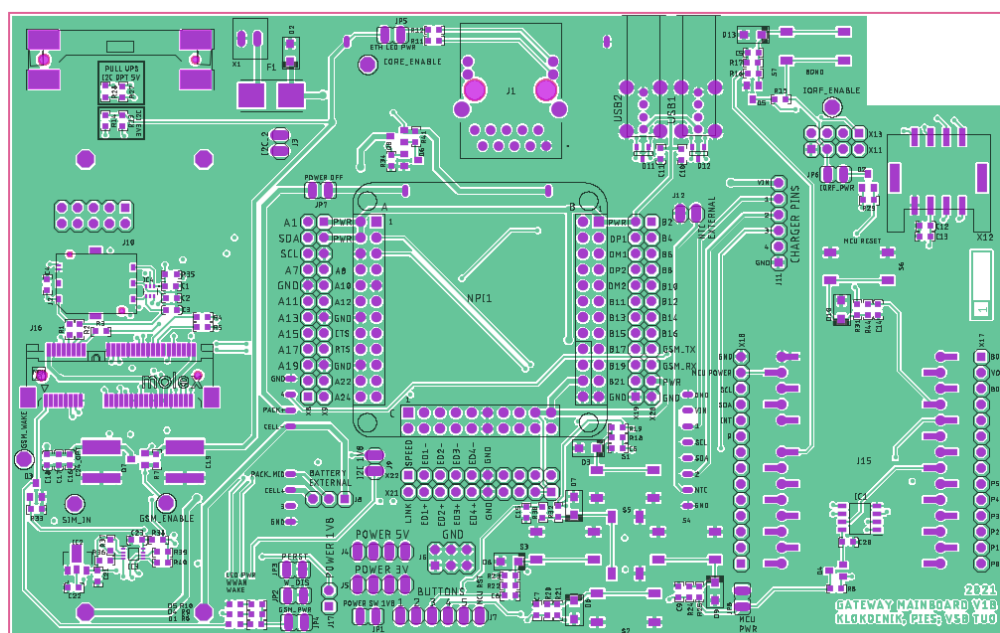


Obrázek 3.13: Blokové schéma komunikační brány

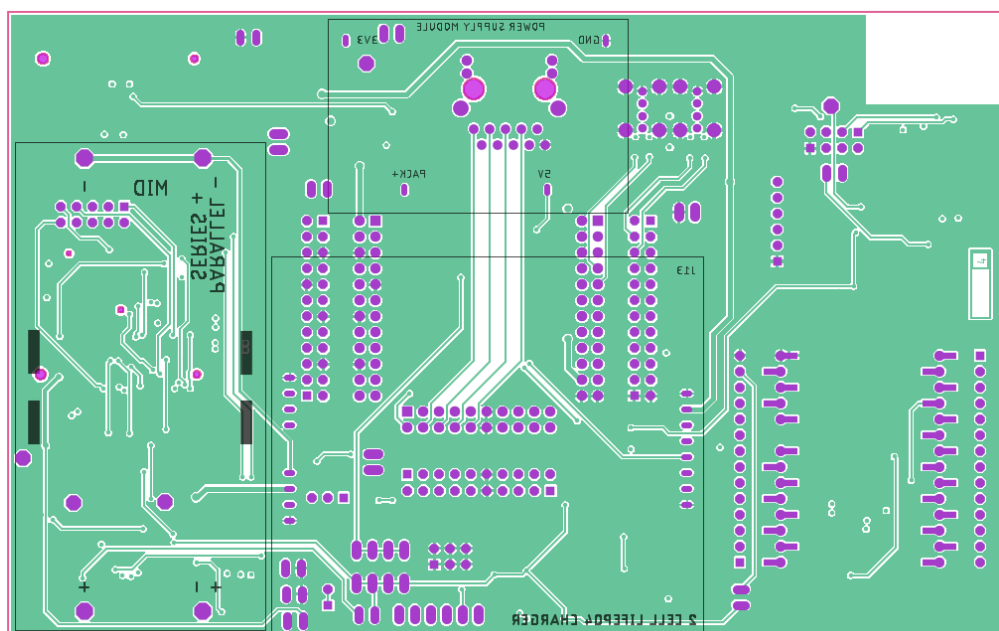
Deska plošných spojů byla rovněž navržena v CAD programu Autodesk Eagle 9.6.2. ve čtyřvrstvě provedení a výroba byla zhotovena firmou Pragoboard s.r.o. První vrstva je pojmenovaná „TOP“ a slouží k umístění SMT součástek a k výkonovým propojením mezi nimi. Druhá vrstva je zemnicí a byla pojmenována „GND_PLANE“. Třetí vrstva „SIGNAL“ slouží primárně k propojení signálů mezi obvody a poslední vrstva „BOTTOM“ slouží pro zemnění, propojení výkonových částí a umístění zbylých součástek.

Přední strana DPS obsahuje LTE modul, výpočetní modul NanoPi Neo Core 2, řídicí modul Hardwario, IQRF modul a zbylé pinové lišty a konektory. Vzhled přední strany DPS zachycuje obrázek 3.14. Na zadní straně je umístěn držák dvou bateriových článků typu 18650 a pinové lišty pro připojení modulu dobíječe a modulu zdroje. Vzhled zadní strany DPS je zobrazen na obrázku 3.15.

Při testování funkčnosti byla základní deska nejprve připojena na výkonový analyzátor Keysight N6705C s proudovým omezením, aby se zjistilo, zda není v některé části vyzkratována. Po kontrole desky byly připojeny jednotlivé moduly a proběhlo testování funkčnosti tranzistorů spínajících napájení pro jednotlivé moduly. Řídicí piny těchto tranzistorů jsou vyvedeny na pinovou lištu k řídicímu modulu, který nebyl při tomto testování připojen, a tyto piny byly fyzicky propojeny pomocí vodičů k určité napěťové hladině. Tímto bylo zjištěno, že tranzistor spínající napájení pro výpočetní modul není zcela uzavřen a na výstupu má několik desetín voltů, což bude v následující verzi vyřešeno. Jiné chyby nebyly při testování prozatím odhaleny.



Obrázek 3.14: Přední strana DPS komunikační brány



Obrázek 3.15: Zadní strana DPS komunikační brány

Kapitola 4

Návrh a realizace firmwaru řídicího modulu

Po návrhu a realizaci hardwaru bylo zapotřebí komunikační bránu uvést do provozu. Konkrétně se jednalo o zajištění základních funkcí, jako je zapínání jednotlivých modulů, sběr dat pomocí komunikačních linek a odesílání zpráv, což zajišťuje firmware mikrokontroléru umístěného na řídicím modulu, o kterém bude pojednávat tato kapitola.

K řízení komunikační brány byl zvolen Hardwario Core modul a firmware byl napsán za pomoci Hardwario SDK knihovny a Visual Studio Code, do kterého bylo nainstalováno rozšíření Platformio, díky kterého lze do modulu nahrát program a dále umožňuje připojení přes sériový monitor. Tato knihovna je navržena pro „low-power“ aplikace, kde je vyžadován bateriový provoz po dobu několika let. Pro využití této knihovny je klíčové pochopit plánování tasků, aby bylo možné v maximální míře šetřit elektrickou energii. K tomuto je důležité mít možnost snadno programovat na základě událostí. K dosažení tohoto cíle poskytuje SDK nástroje, aby výsledná aplikace byla asynchronní. Klíčovou součástí je plánovač neboli scheduler, který zjednodušeně řečeno obsahuje ukazatele na funkce s přesným časem, kdy by měly být spuštěny.

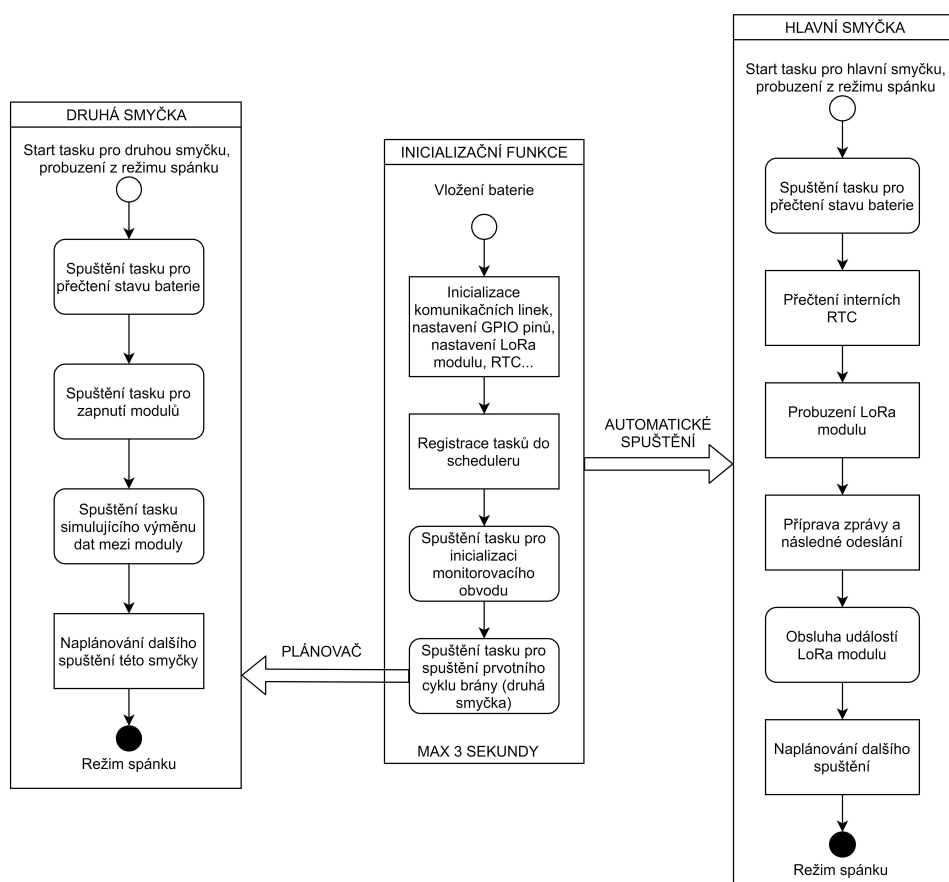
Hardwario vyvinulo vlastní plánovač za účelem jednoduchosti a nízké spotřeby elektrické energie. Jeho hlavní funkcí je plánovat, kdy je třeba určitý úkol spustit. Tento plánovač není plnohodnotný RTOS, nemá reálný kooperativní multitasking a funguje tak, že jeden task je spuštěn a po dokončení je spuštěn další task. Proto je důležité neblokovat task a provést danou operaci co nejrychleji, aby mohl plánovač spustit další úlohu. V nabídce knihovny je několik možností jak a kdy s danou úlohou pracovat, především se zde rozlišuje práce s absolutním a relativním časem, tzn. buď s časem od spuštění firmwaru nebo s časem od aktuálního provádění.[28]

Při psaní firmwaru bylo nejprve odzkoušena základní práce s knihovnou v podobě odchyťávání událostí tlačítek, kde při krátkém stisku došlo k zapnutí určitého modulu a na dlouhý stisk k jeho vypnutí. Postupně byl firmware doplňován o další funkcionality v podobě zprovoznění komunikace s monitorovacím obvodem, zajištění komunikace přes LoRa modul s odchyťáváním událostí, roz-

plánování tasků pomocí scheduleru (plánovače), odzkoušení komunikace s FRAM pamětí apod. Jednotlivé části firmwaru budou detailněji popsány v následujících podkapitolách.

4.1 Princip fungování firmwaru

Firmware komunikační brány obsahuje dvě nezávislé smyčky. První smyčka byla v rámci testování vyvolávána častěji, a proto byla pojmenovaná jako hlavní smyčka. Jejím úkolem je v pravidelných časových okamžicích spouštět task vyčítající stav baterie, přečíst aktuální časové informace, probudit LoRa modul a poslat zprávu o stavu komunikační brány. V poslední části se tato smyčka přihlásí do plánovače s informací o dalším spuštění a poté přejde do režimu spánku. Druhá smyčka slouží k probuzení celé komunikační brány, především se jedná o probuzení modulů, přečtení stavu baterie, spuštění tasku simulující výměnu dat a opět přihlášení se do scheduleru. Těmto dvěma smyčkám předchází inicializační funkce, která je spuštěna pouze po zapnutí napájení řídicího modulu.[28]



Obrázek 4.1: Zjednodušený vývojový diagram firmwaru, zobrazení smyček

4.1.1 Inicializační funkce

Inicializační funkce je spuštěna pouze při prvotním zapnutí a dochází zde k inicializaci sběrnic, LoRa modulu, nastavení GPIO pinů, registraci tasků do plánovače a nastavení výchozích hodnot pro RTC. Dále je zde naplánováno okamžité spuštění inicializační funkce monitorovacího obvodu. V dalším kroku je spuštěn task pro prvotní zapnutí komunikační brány (druhá smyčka). Celá inicializační funkce má časové omezení 3 sekundy. Pokud nastane problém při inicializaci monitorovacího obvodu, tak není spuštěn task pro prvotní zapnutí brány a inicializace monitorovacího obvodu proběhne až při dalším vyčítání stavu baterie, tzn. při následující hlavní smyčce. Tímto je zajištěna nemožnost zaseknutí při inicializaci, a zároveň není ovlivněna celková funkčnost komunikační brány, pouze prvotní spuštění.

4.1.2 Hlavní smyčka

Hlavní smyčka je spouštěna automaticky po inicializační funkci a je analogická smyčkám loop z jiných platform. V této smyčce je nejprve naplánováno okamžité spuštění tasku pro čtení stavu baterie, poté je probuzen LoRa modul a sestavena zpráva, která se ihned odešle pomocí LoRa. Na konci této smyčky je naplánováno její opětovné spuštění, které je nastavitelné pomocí zpětného komunikačního kanálu (LoRa). V rámci testování byla tato smyčka spouštěna každé 2 minuty od ukončení aktuálního provádění (relativní čas). Po dokončení provádění přechází modul do režimu spánku až do chvíle dalšího naplánovaného probuzení. O veškerém zpracování je uživatel informován do konzole.

4.1.3 Druhá smyčka

Druhá smyčka je poprvé zařazena do plánovače v inicializační funkci. Tato smyčka spouští task pro vyčtení stavu baterie, dále obstarává zapnutí výpočetního modulu se zpožděným zapnutím LTE modulu a následně simuluje výměnu dat mezi řídicím a výpočetním modulem. Po dokončení simulované výměny dat dojde k vypnutí modulů a k naplánování dalšího spuštění od aktuálního provádění, které bylo v rámci testování nastaveno na 5 minut. Tento cyklus je opět nastavitelný pomocí zpětného komunikačního kanálu (LoRa).

4.2 Komunikace s monitorovacím obvodem

Komunikace s monitorovacím obvodem probíhá pomocí I²C sběrnice a adresa monitorovacího obvodu je 0x36. Maximální rychlost komunikace s monitorovacím obvodem je až 400 kHz, v inicializační funkci firmwaru byla zinicilizovaná I²C0 linka o rychlosti 100 kHz. Veškeré registry monitorovacího obvodu jsou 2bajtové a obvykle slouží k nastavení více hodnot. Zapisování do těchto registrů je realizováno jako zápis do paměti RAM (energeticky závislá paměť), což znamená, že po odpojení napájení jsou data z registrů ztracena. Rozlišení jednotlivých registrů je rozdílné, a proto bylo

důležité důkladně prostudovat dokumentaci nejen k samotnému monitorovacímu obvodu, ale také i k výpočetnímu algoritmu ModelGauge m5 implementovanému v tomto obvodu. Monitorovací obvod měří napětí, proud a teplotu a na základě těchto měření vypočítává ostatní parametry jako je například TTE (Time To Empty), SOC (State Of Charge) a další.

Díky tomuto výpočetnímu algoritmu není nutné detailně specifikovat parametry baterie, ale stačí jej informovat o základních parametrech. Následující registry jsou vstupem do ModelGauge m5 algoritmu a uchovávají charakterizaci použité baterie. Pro správnou funkčnost monitorovacího obvodu je nutné nastavit tyto povinné registry:

- **DesignCap** – Navrhovaná kapacita baterie
- **VEmpty** – Napěťové hranice
- **ICHGTerm** – Proud ukončení nabíjení

DesignCap registr (adresa 18h) je registr typu Capacity, který má počáteční hodnotu 0x0BB8 (3000d). Tento registr udržuje informaci o nominální kapacitě článku. Je nutné si uvědomit, že při spojení dvou 1,1 Ah článků do série je výsledná kapacita rovněž 1,1 Ah. Rozlišení tohoto registru je 0,5 mAh, což znamená, že pro zvolenou baterii 1100 mAh je nutné do tohoto registru zapsat dekadickou hodnotu 2200, resp. 0x0898 hexadecimálně.

VEmpty registr (3Ah) je registr typu Special, který má počáteční hodnotu 0xA561 (3.3V/3.88V). VEmpty registr nastavuje hranici pro prázdnou (vybitou) a nabitou baterii. Tento registr je společný pro dvě hodnoty s rozdílným rozlišením. Prvních 7 bitů slouží pro nastavení VR (Recovery Voltage) a zbylých 9 bitů pro nastavení VE (Empty Voltage). Pro hodnotu VE je rozlišení jednoho bitu 10 mV, což umožňuje nastavení od 0 V do 5,11 V. Pro hodnotu VR je rozlišení jednoho bitu 40 mV od hodnoty 0 V do 5,08 V.

Tabulka 4.1: Formát VEmpty registru - část VE

D15	D14	D13	D12	D11	D10	D9	D8	D7
VE								

Tabulka 4.2: Formát VEmpty registru - část VR

D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
VR						

VE – hodnota napětí při vybité baterii, při této hodnotě monitorovací obvod hlásí 0 % kapacity. Výchozí hodnota je 3,3 V (i po resetu).

VR – nastavení úrovně napětí, při které dojde k vymazání detekce prázdné baterie. Jakmile napětí na článku vzroste nad tuto hodnotu, je opět povolena detekce prázdné baterie. Rozlišení je 40 mV, což odpovídá rozsahu 0-5,08 V. Výchozí hodnota je 3,88 V a je doporučena pro většinu

aplikací. Komunikační brána má nastavenou elektroniku na maximální napětí 3,6 V a minimální napětí na 2,8 V na článek.

Tabulka 4.3: Hodnota VEmpty registru

VE									VR							
1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	
280 · 10 mV = 2,8V									90 · 40 mV = 3,6V							
0x8C5A																

Dalším povinným registrem je ICHGTerm registr, do kterého je nutné uložit hodnotu, při které je dobíjení dokončeno. Momentální verze dobíječe ukončuje nabíjení při 200 mA. Rozlišení tohoto registru je 0,15625 mA, což znamená, že pro hodnotu 200 mA je nutné do tohoto registru zapsat dekadickou hodnotu 1280, což je 0x0500 hexadecimálně.

Jelikož byla využita LiFePO₄ baterie, bylo nutné změnit i konfiguraci modelu, což znamenalo zapsání hodnoty 0x8068 do ModelCfg registru. Touto hodnotou je nastaven model pro LiFePO₄ baterii, dobíjecí napětí na článek menší jak 4,25 V (VChg = 0), použití 10kΩ NTC (R100 = 0) a dále je obvod informován o aktualizaci modelu (Refresh = 1).[29]

Tabulka 4.4: Formát horního bytu ModelCfg registru

D15	D14	D13	D12	D11	D10	D9	D8
Refresh	0	R100	0	0	VChg	0	0

Tabulka 4.5: Formát spodního bytu ModelCfg registru

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
ModelID				1	0	0	0

- **ModelID = 0** — pro většinu lithium cobalt-oxide variant. Není nutná přesnější charakterizace.
- **ModelID = 2** – pro lithium NCR nebo NCA články (Panasonic). Přesnější charakterizace je doporučena.
- **ModelID = 6** — pro lithium iron-phosphate (LiFePO₄). Přesnější specifikace je doporučena.

Z tohoto dostáváme výslednou hodnotu registru:

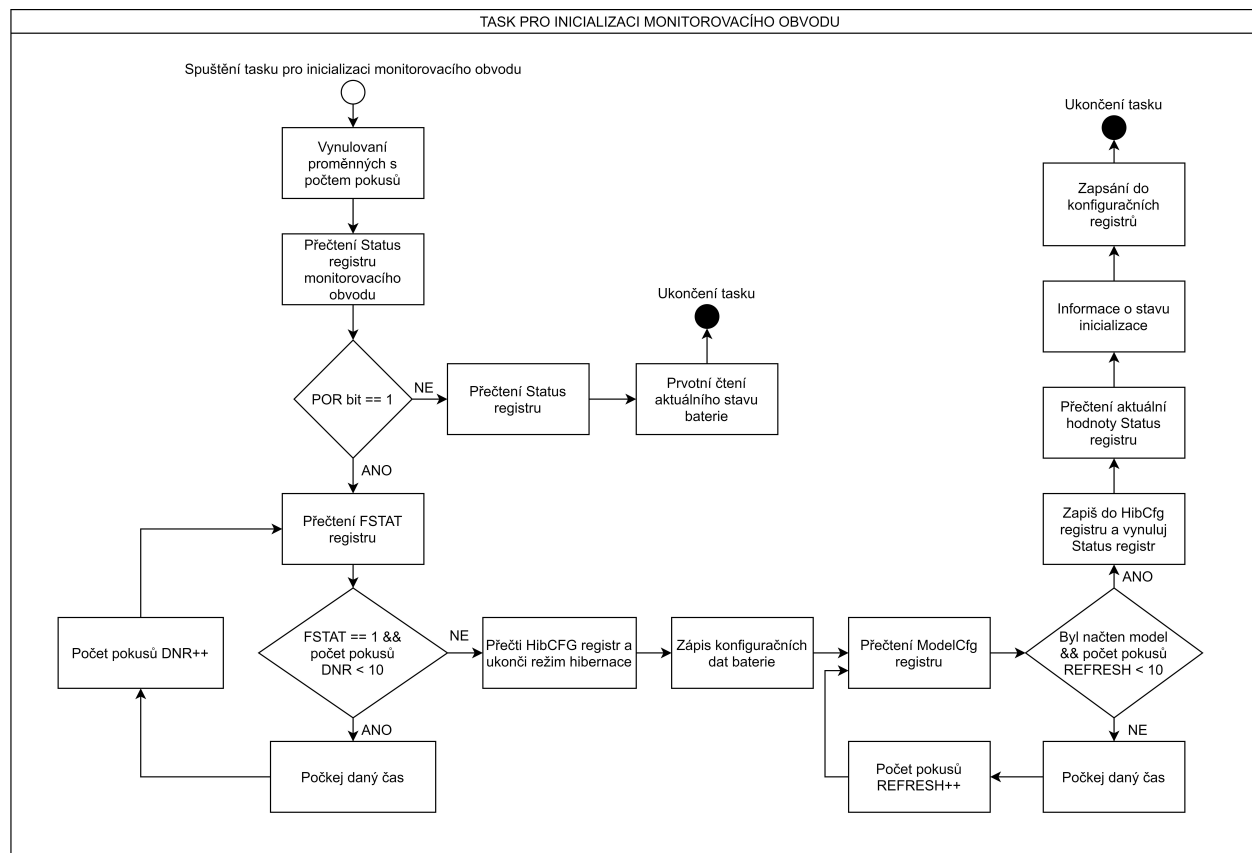
Tabulka 4.6: Hodnota pro zapsání do ModelCfg registru

D15 – D8								D7 – D0							
1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0

Což v binární podobě 1000 0000 0110 1000 znamená dekadickou hodnotu 32 872 a hodnotu 0x8068 v hexadecimální podobě.

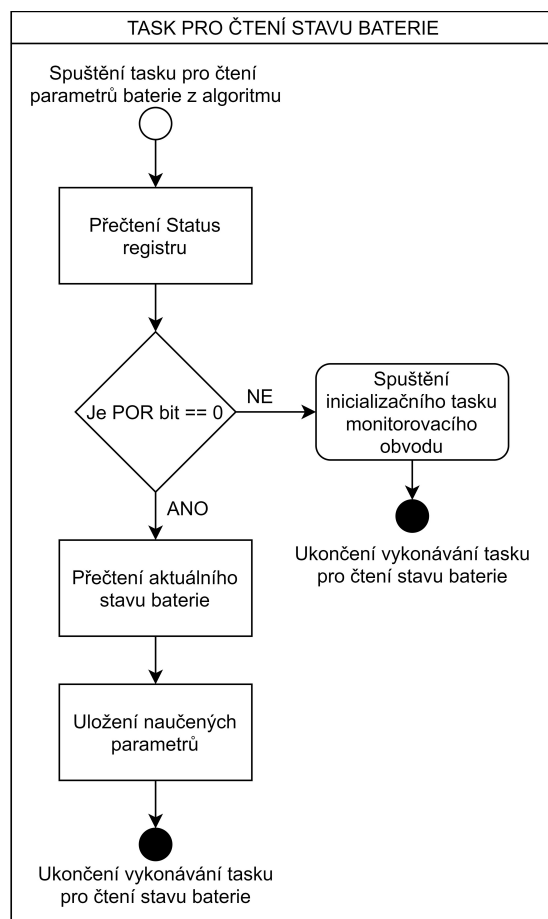
Všechny adresy registrů a hodnoty, které nastavují výpočetní algoritmus, jsou definovány na začátku kódu jako konstanty pomocí identifikátorů. Ukázka struktury registrů a výpočet hodnot pro zapsání jsou uvedeny výše a v dalším popisu nebudou dále rozebírány.

Po vložení baterie je monitorovací obvod bez konfigurace a je nutné jej inicializovat. Toto se děje v inicializační funkci, která je spuštěna pouze jednou po zapnutí řídicího modulu a která spustí zaregistrovaný task v plánovači. Plánovač okamžitě spustí inicializační task pro monitorovací obvod, kde jsou nejprve vynulovány proměnné pro uložení počtu pokusů, dojde k přečtení Status registru a následně se zkontroluje POR bit, který informuje o prvotním zapnutí popř. restartu obvodu. Pokud je tento bit nastaven do 1, tak je přečten registr FSTAT. Dále se zkontroluje DNR bit a pokud je roven 1, tak je v čekací smyčce obvodu dáno více času na korektní nastavení. Program pokračuje, pokud je DNR bit nastaven do 0 nebo byly překročeny maximální pokusy (maximálně 10 pokusů). V dalším kroku dojde k uložení původních hodnot HibCfg registru a dojde k poslání příkazů pro ukončení režimu hibernace a tím je obvod přepnut do manuálního ovládání. Následně dojde k zapsání konfiguračních registrů, které jsou vstupem do výpočetního algoritmu monitorovacího obvodu. Po tomto kroku program čeká jednu sekundu na načtení nového modelu a zkontroluje se Refresh bit. Dokud je Refresh bit nastaven do 1, tak program čeká další sekundu v maximálně 10 iteracích a poté pokračuje dále, kde dojde k přepnutí do automatického režimu, vypsání stavu Status registru a nastavení Config a Config2 registrů. O nepovedených krocích je uživatel informován do konzole a i v případě chyb pokračuje firmware dále, aby nedošlo k zamrznutí celého systému. Před každým čtením stavu baterie je nejprve zkontrolováno, zda došlo ke korektní inicializaci, takže pokud prvotní inicializace neproběhla korektně, v dalším cyklu bude proveden nový pokus o inicializaci monitorovacího obvodu. Algoritmus inicializační funkce monitorovacího obvodu je zachycen na obrázku 4.2.



Obrázek 4.2: Vývojový diagram inicializační funkce monitorovacího obvodu

Druhý task, který využívá komunikace s monitorovacím obvodem, je task pro čtení stavu baterie. Algoritmus tasku pro čtení stavu baterie znázorňuje obrázek 4.3. Tento task je volán plánovačem se spuštěním kterékoliv smyčky, která ovládá komunikační bránu. Před každým přečtením stavu baterie dojde ke kontrole, zda proběhla inicializace a nedošlo k restartu nebo k výpadku napájení. Pokud obvod detekoval restart, výpadek napájení nebo byl špatně inicializován, je spuštěn task pro inicializaci obvodu. Pokud je vše v pořádku, tak jsou z obvodu vyčteny informace o stavu baterie, jako jsou zbývající kapacita, odhadovaný stav v procentech, čas do vybití, průměrná hodnota napětí na článku, průměrně odebíraný proud a teplota. Všechny tyto informace jsou vypsány do konzole a zároveň jsou tyto hodnoty uloženy do proměnných. Hodnoty v těchto proměnných jsou poté součástí LoRa zprávy, která je odesílána s každým voláním hlavní smyčky komunikační brány.



Obrázek 4.3: Vývojový diagram funkce pro čtení stavu baterie

Získaná data z monitorovacího obvodu nejsou nijak přepočítávána a uživateli jsou prezentována v dekadické podobě do konzole a v hexadecimální podobě v LoRa zprávě. Data z monitorovacího obvodu neslouží k ovlivňování řízení brány, ale pouze informují o stavu baterie, protože při prvních cyklech dochází k učení parametrů baterie a monitorovací obvod neinformuje o skutečném stavu. Ve výsledku to znamená, že při prvním spuštění jsou některá data z monitorovacího obvodu nesmyslná, a pokud bychom využívali např. SOC (State Of Charge) pro omezení zapínání brány, mohlo by dojít k tomu, že i když bude baterie nabitá, tak se komunikační brána nezapne, protože by monitorovací obvod informoval řídicí mikrokontrolér o nízkém stavu baterie a tudíž by omezil zapnutí modulů. Aby monitorovací obvod vykazoval dostatečnou přesnost, je nutné projít několika nabíjecími/vybíjecími cykly. Postupem času je baterie zmapována. Naučené hodnoty jsou posílány s každou LoRa zprávou. Pokud by z nějakého důvodu došlo k vyjmutí baterie a smazání naučených parametrů, lze zpětným LoRa komunikačním kanálem nastavit na monitorovacím obvodu naučené parametry bezdrátově pomocí speciálního příkazu.

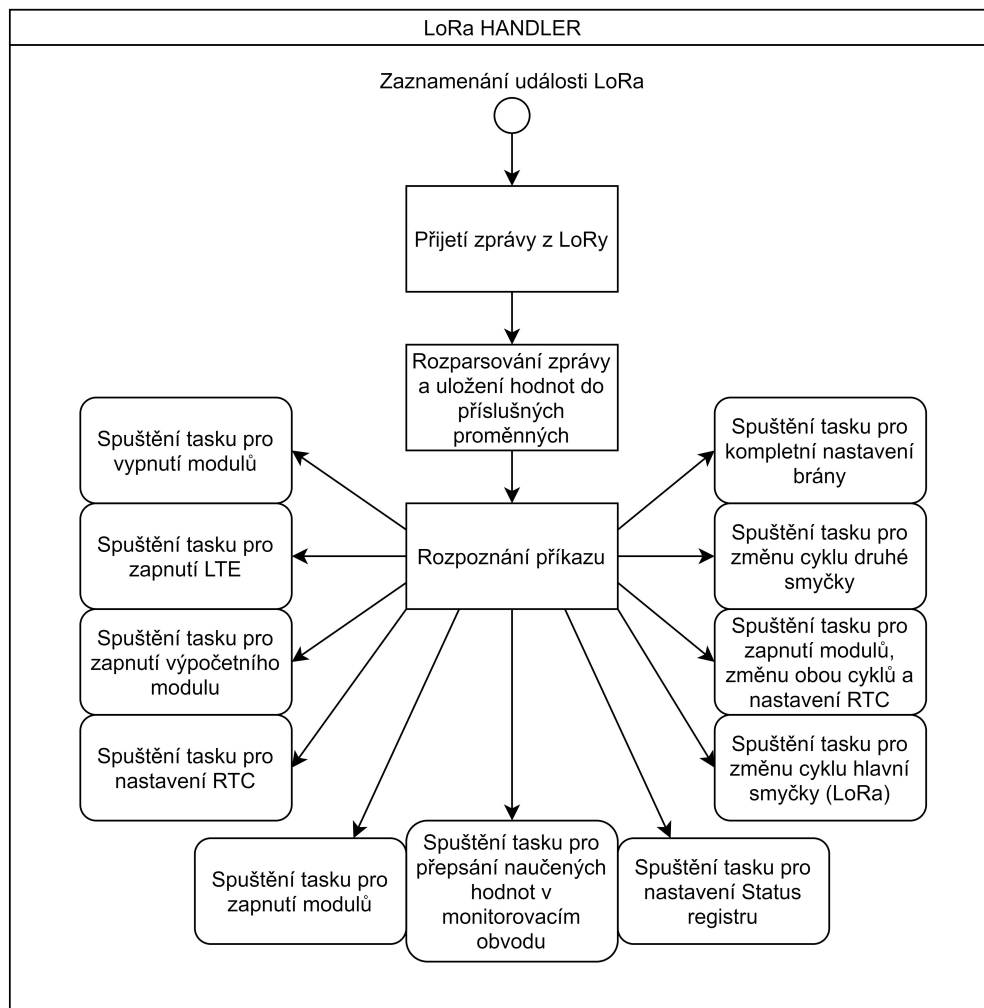
4.3 Komunikace s LoRa modulem

Pro komunikaci v rámci LoRaWAN sítě byl použit LoRa modul od společnosti Hardwario, který je připojen ke řídicímu modulu pomocí patice. Komunikace s tímto modulem probíhá pomocí komunikační linky UART1. Pro zjednodušení práce bylo využito SDK knihovny, nicméně použitá verze nefungovala dle představ a knihovna musela být lehce upravena.

Po připojení LoRa modulu k řídicímu modulu bylo nutné zaregistrovat LoRa modul. Tato část byla řešena manuálně pomocí Hterm terminálu a AT příkazů. Registrace proběhla pomocí metody OTAA (Over The Air Activation) u CRA (České Radiokomunikace). Nejprve byl do modulu poslán příkaz pro získání APPS klíče a jeho uložení. Dále bylo nutné získat DEVEUI z LoRa čipu, APPEUI, APPKEY klíče a následně nastavit čip do módu 1 a poslat příkaz JOIN a počkat na odpověď. Pokud se nepodařilo připojit do sítě, bylo nutné předchozí kroky opakovat. Poté došlo k zaregistrování u CRA, kde bylo zapotřebí zvolit metodu registrace (OTAA), dále zadat DEVEUI (identifikátor zařízení), APPEUI (device application EUI), APPKEY (aplikační klíč) a vybrat dostupnou službu. Zaregistrované LoRa zařízení lze vidět v záložce „Zařízení“ pod identifikátorem zařízení (DEVEUI). Z webového rozhraní lze exportovat přijatá data z komunikační brány nebo posílat zprávy směrem ke komunikační bráně.

Ve firmwarové části musí nejprve dojít k inicializaci LoRa modulu, kde je nutné zadefinovat, která z UART linek byla pro LoRa komunikaci využita. Dále je potřeba zadefinovat handler, který se bude starat o události z LoRa, nastavit metodu registrace a určit třídu. Jelikož bylo nutné co nejvíce šetřit elektrickou energii, a zároveň LoRa slouží jako záložní komunikační kanál, byla zvolena třída A, u které LoRa modul po odvysílání zprávy počká dvě časová okna (každé o velikosti jedné sekundy) na příjem zprávy z CRA, a poté je modul vypnut. S LoRa modulem se dále pracuje v hlavní smyčce, která probíhá každé 2 minuty, kde dojde k probuzení LoRa modulu a odeslání zprávy. O veškeré stavy, které mohou během vysílání/přijímání nastat se stará LoRa handler.

Pokud je přijata zpráva z CRA, tak je v LoRa handleru tato zpráva po jednom bajtu zpracována a hodnoty jsou uloženy do LoRa proměnných. Poté dojde k identifikaci hlavičky zprávy, která určuje, jaká činnost bude provedena. Po rozpoznání příkazu jsou spuštěny příslušné tasky, které nastavují parametry komunikační brány. Pro lepší představivost poslouží příklad, kdy z CRA přijde zpráva, která obsahuje časové informace, cyklus hlavní smyčky a cyklus druhé smyčky, nicméně hlavička zprávy (příkaz) určuje pouze nové nastavení RTC v komunikační bráně. Při zpracování tedy dojde pouze k nastavení RTC a cyklus hlavní smyčky a cyklus druhé smyčky nebudou změněny. Součástí zpracování zpráv je i kontrola na nereálné hodnoty, např. u zmíněných hodin reálného času, kde jsou ošetřeny hraniční hodnoty. Při nastavování měsíce na hodnotu 13 je měsíc v časové informaci nastaven na maximální hodnotu 12.



Obrázek 4.4: Zjednodušený vývojový diagram LoRa handleru

4.3.1 Struktura zprávy z komunikační brány

Tato zpráva slouží k informování o provozním stavu komunikační brány. Struktura této zprávy je znázorněna v následující tabulce. Všechny hodnoty jsou jednobajtové (`uint8_t`) s hodnotami v rozmezí 0-255. V případě dvoubajtových hodnot je nejprve zapsán MSB a poté LSB. Velikost zprávy je pokaždé stejná a je fixně nastavena na 27 bajtů. Hlavička nabývá dvou hodnot, 0x00 signalizuje prvotní komunikaci, 0x01 signalizuje aktualizaci stavu.

První až dvanáctý bajt obsahují informace o stavu baterie, třináctý a čtrnáctý bajt obsahují informaci o cyklování hlavní smyčky, která posílá informace přes LoRu a dále určuje četnost vyčítání stavu baterie. Patnáctý a šestnáctý bajt informují o stavu monitorovacího obvodu včetně varování při překročení hraničních hodnot a zbytek bajtů jsou naučené parametry charakterizující použitou baterii.

Tabulka 4.7: Struktura zprávy z komunikační brány

Bajt	Název	Popis
0. bajt	Header	Hlavička
1. bajt	RepCap (MSB)	Zbývajících kapacita
2. bajt	RepCap (LSB)	Zbývajících kapacita
3. bajt	RepSOC (MSB)	Úroveň nabití
4. bajt	RepSOC (LSB)	Úroveň nabití
5. bajt	AvgVCell (MSB)	Napětí článku
6. bajt	AvgVCell (LSB)	Napětí článku
7. bajt	AvgCurrent (MSB)	Odebíraný proud
8. bajt	AvgCurrent (LSB)	Odebíraný proud
9. bajt	TTE (MSB)	Čas do vybití
10. bajt	TTE (LSB)	Čas do vybití
11. bajt	AvgTemp (MSB)	Teplota
12. bajt	AvgTemp (LSB)	Teplota
13. bajt	cyklus_minut_lora (MSB)	Cyklus hlavní smyčky
14. bajt	cyklus_minut_lora (LSB)	Cyklus hlavní smyčky
15. bajt	Status (MSB)	Stav monitorování
16. bajt	Status (LSB)	Stav monitorování
17. bajt	Saved_RCOMP0 (MSB)	Naučený parametr
18. bajt	Saved_RCOMP0 (LSB)	Naučený parametr
19. bajt	Saved_TempCo (MSB)	Naučený parametr
20. bajt	Saved_TempCo (LSB)	Naučený parametr
21. bajt	Saved_FullCapRep (MSB)	Naučený parametr
22. bajt	Saved_FullCapRep (LSB)	Naučený parametr
23. bajt	Saved_Cycles (MSB)	Naučený parametr
24. bajt	Saved_Cycles (LSB)	Naučený parametr
25. bajt	Saved_FullCapNom (MSB)	Naučený parametr
26. bajt	Saved_FullCapNom (LSB)	Naučený parametr

4.3.2 Struktura zprávy z LoRy

Pro případ nutnosti změny některých parametrů brány byl do firmwaru zakomponováno zpětné zpracování požadavku. Tento požadavek může být přijat pouze v případě předchozího odvysílání dat, protože je LoRa modul provozován ve třídě A. O veškeré zpracování dat se stará již výše zmiňovaný LoRa handler. Struktura zpětné zprávy z LoRy je znázorněna v následující tabulce 4.8.

Nultý bajt zprávy určuje typ příkazu, který se má provést. První až šestý bajt slouží k nastavení interních hodin reálného času, sedmý a osmý bajt slouží k nastavení cyklování brány a vysílání LoRy, devátý a desátý bajt slouží k nastavování (resetování) Status registru monitorovacího obvodu. Zbytek bajtů slouží k nastavení naučených parametrů do monitorovacího obvodu. Tohoto lze

Tabulka 4.8: Struktura zprávy z LoRy

Bajt	Název	Popis
0. bajt	Hlavička	Určuje příkaz pro zpracování
1. bajt	RTC (rok)	Nastavení RTC (rok)
2. bajt	RTC (měsíc)	Nastavení RTC (měsíc)
3. bajt	RTC (den)	Nastavení RTC (den)
4. bajt	RTC (hodina)	Nastavení RTC (hodina)
5. bajt	RTC (minuta)	Nastavení RTC (minuta)
6. bajt	RTC (sekunda)	Nastavení RTC (sekunda)
7. bajt	cyklus_minut_brana	Nastavení cyklu druhé smyčky
8. bajt	cyklus_minut_lora	Nastavení cyklu hlavní smyčky
9. bajt	Status (MSB)	Nastavení Status registru
10. bajt	Status (LSB)	Nastavení Status registru
11. bajt	Saved_RCOMP0 (MSB)	Naučený parametr pro nastavení monitoru
12. bajt	Saved_RCOMP0 (LSB)	Naučený parametr pro nastavení monitoru
13. bajt	Saved_TempCo (MSB)	Naučený parametr pro nastavení monitoru
14. bajt	Saved_TempCo (LSB)	Naučený parametr pro nastavení monitoru
15. bajt	Saved_FullCapRep (MSB)	Naučený parametr pro nastavení monitoru
16. bajt	Saved_FullCapRep (LSB)	Naučený parametr pro nastavení monitoru
17. bajt	Saved_Cycles (MSB)	Naučený parametr pro nastavení monitoru
18. bajt	Saved_Cycles (LSB)	Naučený parametr pro nastavení monitoru
19. bajt	Saved_FullCapNom (MSB)	Naučený parametr pro nastavení monitoru
20. bajt	Saved_FullCapNom (LSB)	Naučený parametr pro nastavení monitoru

využít například při výměně baterií, kdy zpětným komunikačním kanálem můžeme nahrát naučené parametry z předchozí baterie a tím zrychlit učení nově vložené baterie.

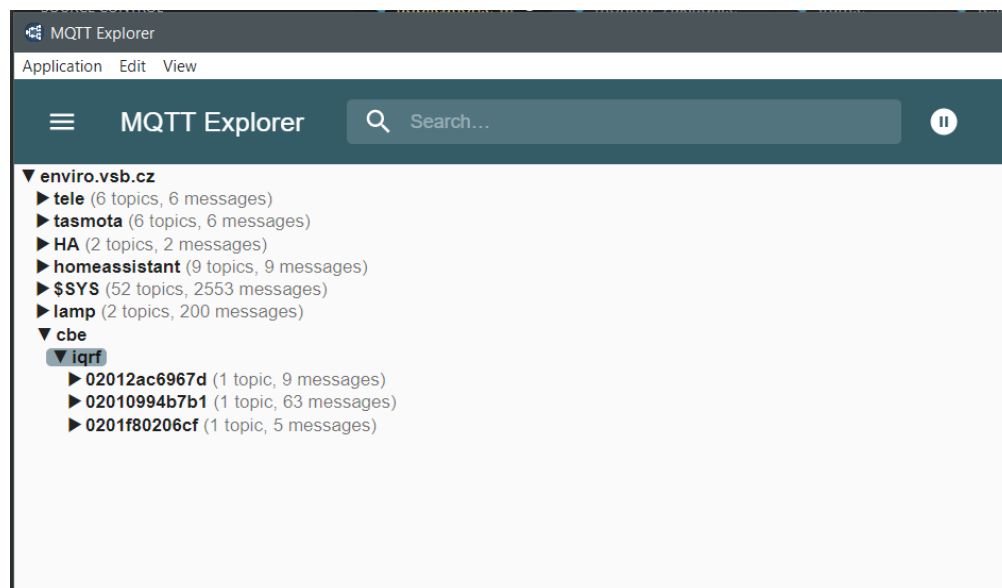
Tabulka 4.9: Typy příkazů

Hlavička/Příkaz	Akce
0x00	Vypni všechny moduly
0x01	Zapni LTE modul
0x02	Zapni výpočetní modul
0x03	Zapni výpočetní modul + LTE
0x04	Změň cyklus brány (druhá smyčka)
0x05	Nastav RTC
0x06	Změň cyklus LoRy (hlavní smyčka)
0x07	Zapni moduly, změň oba cykly, nastav RTC
0x08	Aktualizuj naučené parametry monitorovacího obvodu
0x09	Nastav status registr monitorovacího obvodu
0x0A	Zapni moduly, změň oba cykly, nastav RTC, aktualizuj monitorovací obvod, nastav Status registr

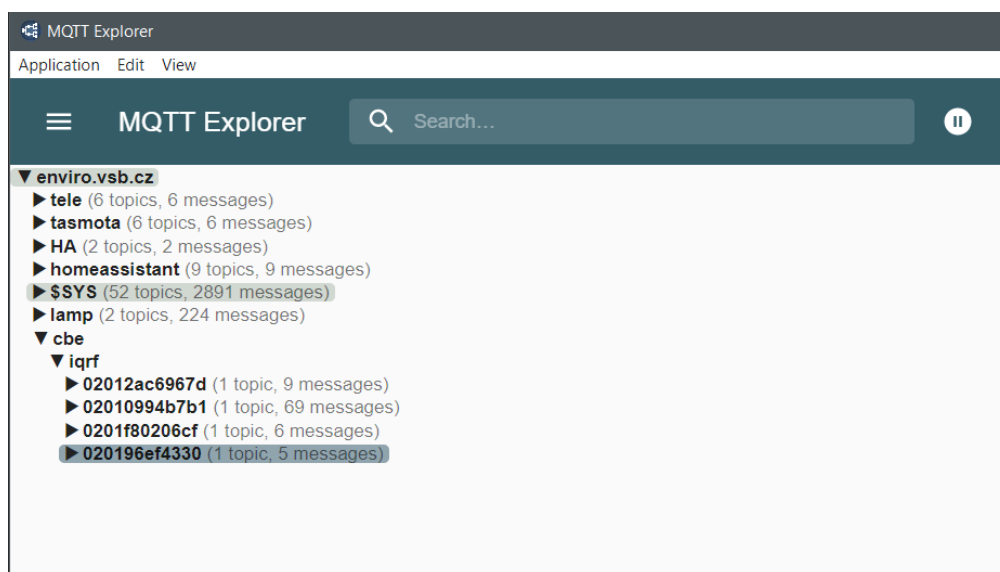
4.4 Komunikace s výpočetním modulem

Komunikace s výpočetním modulem je realizována pomocí UART0 linky. V současné době pracuje firma Microrisc, s.r.o. na vývoji nové verze Daemona, kde bude definovaný nový protokol na výměnu dat. Metody pro výměnu dat pomocí této sběrnice jsou v SDK knihovně implementovány. Do firmwaru byl implementován task, který bude zpracovávat data z tohoto protokolu a zpětně komunikovat s výpočetním modulem. Jelikož je nová verze Daemona s touto funkcionalitou stále ve vývoji, tak je reálná výměna dat pouze simulována uvnitř tasku pro výměnu dat. Lze předpokládat, že struktura protokolu bude podobná struktuře zprávy odesílané přes LoRu.

K otestování funkčnosti byl na výpočetní modul nainstalován OS Armbian. Důležité bylo nakonfigurovat jádro pro SPI a dále zajistit, aby nedošlo k inicializaci I²C linky, která by mohla kolidovat s I²C linkou řídicího modulu. Poté došlo k instalaci IQRF Daemona, Webapp a posléze k instalaci LTE modemu. V rozhraní Gateway Daemona byla do Scheduleru přidána úloha, která každých deset vteřin posílala přes LTE zprávu. Korektní odeslání bylo poté ověřeno pomocí MQTT Exploreru. Z obrázku 4.5 můžeme vidět přítomnost 3 komunikačních bran. Po spuštění této komunikační brány přibyl v seznamu další identifikátor a během jednoho cyklu brány bylo posláno 5 zpráv.



Obrázek 4.5: Seznam dostupných bran



Obrázek 4.6: Seznam dostupných bran včetně nově připojené

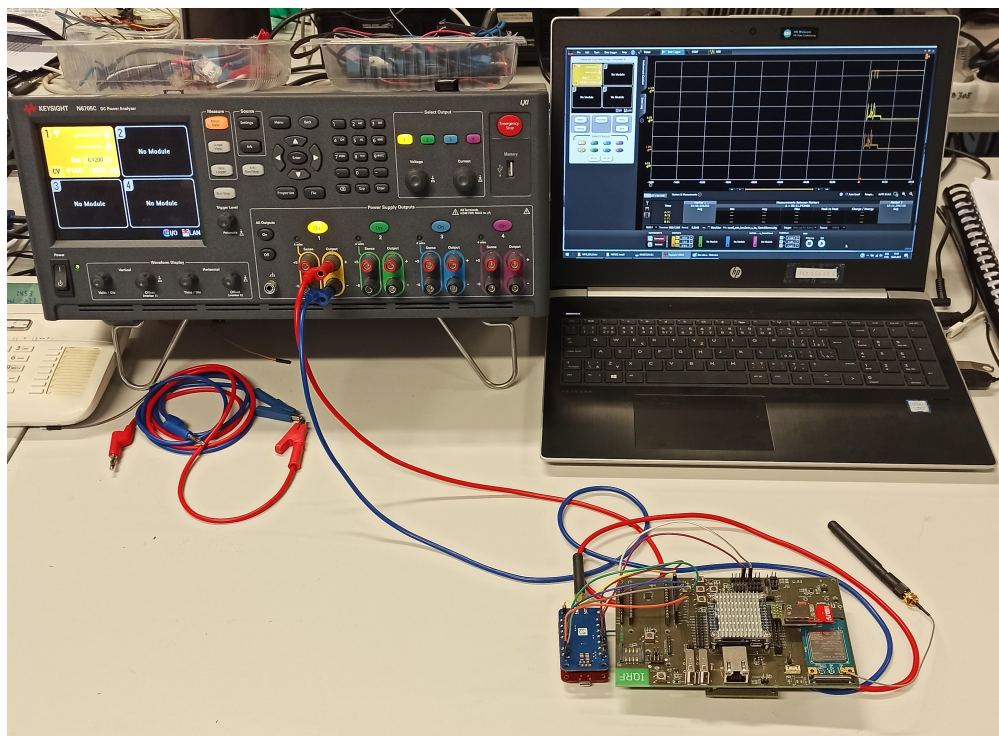
Kapitola 5

Analýza energetické náročnosti

Tato kapitola se zabývá měřením a analýzou energetické náročnosti komunikační brány v testovacím provozním režimu. Naměřené výsledky jsou zobrazeny v grafech a porovnány v tabulkách. Měření spotřeby elektrické energie probíhalo s odpojeným zdrojem elektrické energie pro dobíjení, aby bylo vyloučeno dobíjení v průběhu měření. Jelikož je modul dobíječe součástí komunikační brány, byl při měření k základní desce připojen, aby byla změřena i jeho vlastní spotřeba. Nominální napětí baterie je 6,6 V a komunikační brána je provozována při napětí od 5,6 V do 7,2 V. Veškeré elektronické součástky jsou napájeny napětím z měničů na modulu zdroje. Měřená spotřeba elektrické energie je celková včetně ztrát v obvodech. Pro zobrazení průběhu napětí, proudu a výkonu bylo využito softwaru Keysight 14585A, který je schopen zobrazit minimální a maximální hodnoty a pomocí „markerů“ vypočítat průměrné hodnoty z daného úseku průběhu. V průběhu měření bylo napájecí napětí konstantní a odebíraný výkon zde určoval elektrický proud, a proto pro výsledné zpracování dat bylo využito pouze průběhu proudu.

Po celou dobu měření byla baterie odpojena a místo ní byl připojen výkonový analyzátor Keysight N6705C jako zdroj elektrické energie s konstantním napětím 6,12 V a proudovým omezením na 3 A. Výstupní napětí bylo dáno maximálním výstupním napětím měřicí karty v analyzátoru pro danou periodu vzorkování. V případě přepnutí měřicí karty na vyšší rozsah by došlo ke zvětšení periody vzorkování a výsledný měřený průběh by byl méně přesný. Vzorkovací perioda byla automaticky nastavena na 204,8 μ s, což odpovídá vzorkovací frekvenci 4882,8125 Hz.

Měření spotřeby nejprve probíhalo pro modul zdroje a modul dobíječe. Při tomto měření byla komunikační brána vypnuta a byla měřena pouze spotřeba obvodů starajících se o korektní provoz baterie včetně napájení modulu zdroje, konkrétně se jedná o obvod dobíječe, monitorovací obvod, oba napěťové měniče, nadproudovou ochranu a napěťovou ochranu. Zde bylo při napájení 6,12 V dosaženo průměrného proudového odběru 1,51 mA.

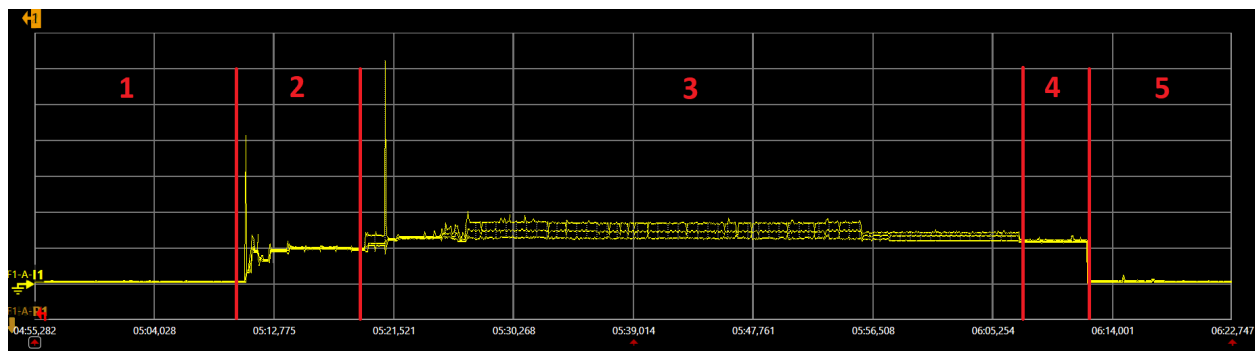


Obrázek 5.1: Měření spotřeby na měřicím pracovišti

5.1 Měření spotřeby bez komunikace

Při prvním měření testovacího provozního stavu brána ohlašovala svůj provozní stav každé 2 minuty pomocí technologie LoRa. Při tomto hlášení stavu si brána počkala, zda přijde zpětný požadavek (2 časová okna) na nové nastavení parametrů a poté přešla do režimu spánku. V druhé nezávislé smyčce se brána probouzel každých 5 minut a zapínala výpočetní modul s IQRF modulem na dobu 1 minuty. Po 10 vteřinách byl opožděně zapnut LTE modul, který ale nevysílal, protože v plánovači Gateway Daemona nebyla nastavena komunikace. Dále bylo odzkoušeno, že připojení modulu do LTE sítě trvá přibližně jednu minutu a až po této době lze data odeslat. Toto měření je zde pouze pro porovnání provozního stavu s LTE komunikací a bez ní. V režimu bez komunikace proběhly 3 měření s rozdílným počtem cyklů a byly zprůměrovány průměrné hodnoty pro jednotlivé cykly. Proudový odběr v provozním stavu bez LTE komunikace je zobrazen na následujícím obrázku 5.2. Průběh je rozdělen na 5 oblastí, první a pátá oblast zobrazují režim spánku, kde jsou moduly vypnuty nebo jsou provozovány s minimálním proudovým odběrem a spotřeba v této oblasti byla průměrně 6,9 mA. Druhá oblast zobrazuje průběh proudu při zapínání výpočetního modulu a průměrná spotřeba v této oblasti byla 139,57 mA. Třetí oblast zobrazuje zapínání LTE modulu a je časově nejnáročnější. Ve čtvrté oblasti je LTE modul v pohotovostním režimu. Doba po kterou je komunikační brána zapnuta je jedna minuta (oblast 2 až 4) a průměrný proudový odběr je zde 212,11 mA. Doba trvání mezi

celkovými cykly je 5 minut (z toho 1 minuta provoz brány, 4 minuty režim spánku a co 2 minuty vysílání pomocí LoRa). Jeden takovýto cyklus bez LTE komunikace má průměrnou spotřebu 48,45 mA a proudové špičky zde dosahují hodnoty až 1,02 A. V tabulce 5.1 jsou uvedeny průměrné hodnoty a v závorkách jsou uvedeny čísla oblastí. Průběh proudového odběru při LoRa vysílání není na obrázku 5.2 vidět, protože jeho proudový odběr daleko nižší.

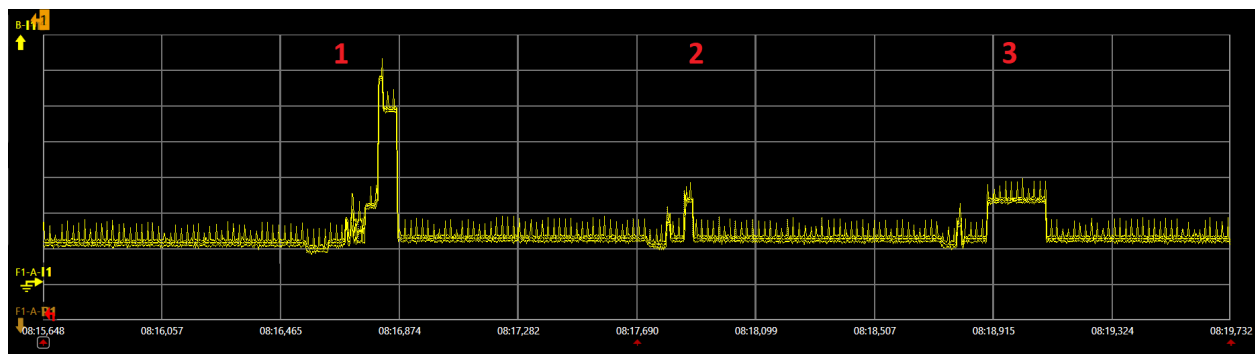


Obrázek 5.2: Průběh proudového odběru při provozním stavu bez LTE komunikace

Tabulka 5.1: Průměrné hodnoty proudových odběrů - provozní stav komunikační brány bez LTE komunikace

Proudový odběr	1. cyklus	2. cyklus	3. cyklus	Průměr	Max
Zapnutí výpočetního modulu (2)	139,77 mA	130,84 mA	148,1 mA	139,57 mA	1,02 A
Provozní cyklus (2-4)	212,37 mA	209,63 mA	214,34 mA	212,11 mA	1,02 A
Režim spánku (1,5)	6,90 mA	6,92 mA	6,90 mA	6,91 mA	6,92 mA
LoRa vysílání a příjem	9,34 mA	9,39 mA	9,29 mA	9,34 mA	42,5 mA
Provozní cyklus vč. režimu spánku (1-5)	49,03 mA	47,87 mA	-	48,45 mA	1,02 A

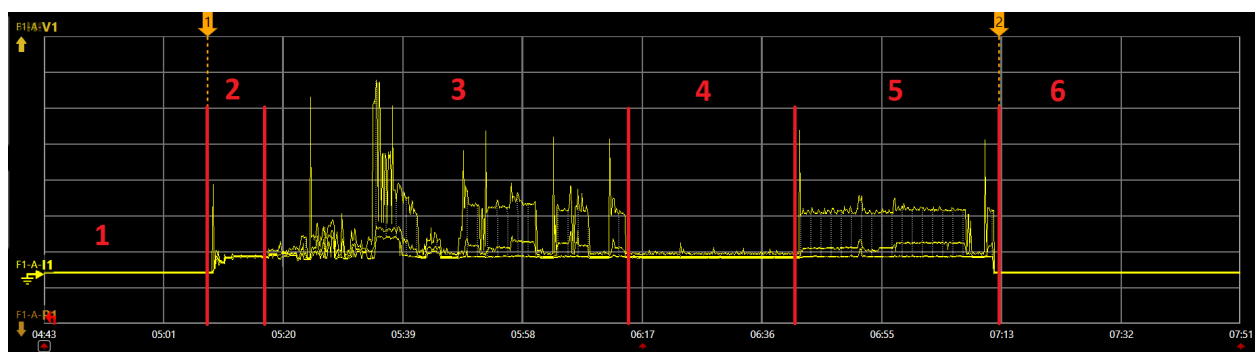
Průběh proudového odběru při LoRa vysílání (obrázek 5.3) lze získat přiblížením dané oblasti. V první části byl zapnut LoRa modul a došlo k odvysílání zprávy z brány. V druhé a ve třetí části průběhu byl opět zapnut LoRa modul a byla provedena kontrola, zda byla poslána zpráva směrem k bráně. Tyto dvě proudové špičky jsou dány zvolenou třídou LoRa modulu (třída A), kdy modul po odvysílání dat otvírá dvě naslouchací okna do 2 sekund od odvysílání. Průměrný proudový odběr byl 9,34 mA a maximální proudový odběr činil 42,5 mA.



Obrázek 5.3: Průběh proudového odběru při LoRa vysílání

5.2 Měření spotřeby s komunikací

V dalším kroku měření spotřeby byla komunikační brána v testovacím provozním režimu, kdy každé 2 minuty byla probouzena, aby pomocí technologie LoRa poslala informace o svém provozním stavu. Pokud nezaznamenala žádný zpětný požadavek, přešla opět do režimu spánku. Druhá smyčka probouzela komunikační bránu každých 5 minut, kdy došlo k zapnutí výpočetního modulu, IQRF modulu, opožděnému zapnutí LTE modulu, přečtení stavu baterie a odvysílání zprávy pomocí LTE. V tomto provozním stavu byla komunikační brána zapnuta po dobu 2 minut a došlo zde ke korektnímu zapnutí modulů, výměně informací mezi moduly a odvysílání zprávy přes LTE. Po uplynutí 2 minut přešla brána do režimu spánku s minimálním proudovým odběrem. Oproti prvnímu měření zde došlo k prodloužení doby běhu brány na dvojnásobek a k modifikaci plánovače Gateway Daemona, který každých 10 vteřin pošle zprávu přes LTE.



Obrázek 5.4: Průběh proudového odběru při provozním stavu s LTE komunikací

Průběh proudového odběru z obrázku 5.4 je opět rozdělen do několika oblastí. V první a v šesté oblasti je brána v režimu spánku s minimálním proudovým odběrem, který je průměrně 7,28 mA. V druhé oblasti dochází k zapínání výpočetního modulu a průměrný proudový odběr v této oblasti byl 128,17 mA a maximální proudový odběr 2,1 A. Ve třetí oblasti dochází k zapnutí LTE modulu

spolu s připojením do sítě. Ve čtvrté oblasti je LTE modul v pohotovostním režimu a čeká na přijetí zprávy k odvysílání. Pátá oblast zobrazuje odvysílání zprávy pomocí LTE modulu.

Tabulka 5.2: Průměrné hodnoty proudových odběrů - provozní stav komunikační brány s LTE komunikací

Proudový odběr	1. cyklus	2. cyklus	3. cyklus	Průměr	Max
Zapnutí výpočetního modulu (2)	131,41 mA	129,20 mA	123,91 mA	128,17 mA	2,10 A
Provozní cyklus (2-5)	213,87 mA	207,31 mA	203,74 mA	208,31 mA	2,10 A
Režim spánku (1,6)	7,26 mA	7,25 mA	7,32 mA	7,28 mA	7,32 mA
LoRa vysílání a příjem	9,64 mA	9,65 mA	9,70 mA	9,66 mA	42,27 mA
Provozní cyklus vč. režimu spánku (1-6)	91,56 mA	91,14 mA	90,89	91,20 mA	2,11 A

Z naměřených hodnot je patrné, že spotřeba elektrické energie, která je v tomto případě dána proudovým odběrem zařízení, je dána především délkou aktivního běhu v provozním cyklu. Vysílání přes LoRu a čtení provozního stavu baterie nemá zásadní vliv na celkovou spotřebu. V prvním případě bez LTE komunikace byl průměrný proudový odběr přibližně 48,45 mA při 1minutovém provozním cyklu. V druhém případě, kdy došlo i k odvysílání zprávy pomocí LTE modulu, byla průměrná spotřeba mezi cykly komunikační brány přibližně 91,20 mA, avšak při 2minutovém provozním cyklu. Celková výdrž brány bude dána četností jejího spouštění. Za účelem zvýšení výdrže lze cyklus posílání LoRa zprávy a cyklus probouzení zkrátit nastavením jiných časových konstant ve firmwaru řídicího modulu nebo za pomoci zpětné zprávy přijaté pomocí LoRy. Doba běhu brány v provozním cyklu je nutná po dobu alespoň 2 minut, aby došlo ke korektnímu zapnutí výpočetního modulu, LTE modulu, všech služeb a odvysílání zpráv.

5.3 Teoretická výdrž baterie

Pro napájení komunikační brány byly použity dva LiFePO_4 články s kapacitou 1,1 Ah, které byly zapojeny do série, čímž bylo dosaženo vyššího napětí, ale kapacita a maximální odebíraný proud jsou totožné jako v případě jednoho článku. Díky vybranému typu baterie není nutné do výpočtu výdrže zahrnovat napětí, protože LiFePO_4 baterie má plochou napěťovou charakteristiku v závislosti na kapacitě, a tudíž lze do výpočtu zahrnout deklarovanou kapacitu 1100 mAh.

K výpočtu teoretické výdrže bude nejprve vycházeno z testovaného provozního stavu, kde se měřil proudový odběr. Testovací provozní stav se skládal ze dvou smyček, které běžely nezávisle na sobě. První smyčka každé dvě minuty sbírala data o stavu baterie a komunikovala pomocí LoRa technologie. Druhá smyčka byla spouštěna každých 5 minut a na dobu 2 minut uvedla bránu do klasického provozního režimu, kde byla odsimulována výměna dat, zapnutí komunikačních modulů s následnou komunikací přes LTE. Po vykonání těchto smyček přešla brána do režimu spánku.

V tomto režimu měl testovaný prototyp brány průměrnou spotřebu 91,20 mA za jeden 5minutový cyklus. Z tohoto lze jednoduše určit počet takovýchto cyklů na plně nabitou baterii podělením kapacity průměrnou hodnotou proudového odběru na jeden cyklus, která je rovna 12,06 cyklů. Pro další teoretické výpočty bude vycházeno z průměrně naměřených hodnot 2minutového provozního cyklu a zvoleného časového intervalu režimu spánku. Do výpočtů nebude zahrnuto LoRa vysílání popř. příjem, protože při reálném nasazení bude tato technologie sloužit jako záložní komunikační kanál a komunikace pomocí této technologie nebude až tak častá. Navíc lze z předešlých měření usoudit, že toto vysílání nijak zásadně neovlivnilo výslednou spotřebu a průměrná spotřeba při vysílání popř. příjmu byla lehce zvýšena oproti režimu spánku.

Řekněme, že tato brána bude nasazena v aplikaci, kdy bude nutné každou hodinu bránu zapnout na dobu jednoho provozního cyklu, který je nastaven na 2 minuty, obstarat sběr dat s následným posláním na cloud a poté přejít do režimu spánku. To znamená, že provozní cyklus včetně režimu spánku bude 60 minut, z toho je 2 minuty provozní cyklus s průměrným proudovým odběrem 208,31 mA a 58 minut je režim spánku s průměrným proudovým odběrem 7,28 mA. Vynásobením odběru s časy a následným podělením celkovým časem dostaneme teoretický proudový odběr během hodinového cyklu. Tímto dostáváme teoretickou hodnotu proudového odběru 13,98 mA při hodinovém cyklování. Podělením kapacity touto hodnotou dostáváme teoretický počet hodinových cyklů na jedno nabití baterie, který je 78,68 hodin. Způsob výpočtu je naznačen v následujících vzorcích.

$$Avg_I_{cyklus} = \left(\frac{(t_{aktivní} \cdot Avg_I_{aktivní}) + (t_{spánek} \cdot Avg_I_{spánek})}{t_{celkový_cyklus}} \right) \quad (5.1)$$

Z příkladu výše vyplývá, že Avg_I_{cyklus} je průměrná spotřeba během hodinového cyklu, $t_{aktivní}$ je doba aktivního běhu brány v minutách (2 minuty), $Avg_I_{aktivní}$ je průměrný proudový odběr při aktivním běhu brány (208,31 mA), $t_{spánek}$ je doba v režimu spánku v minutách (58 minut), $Avg_I_{spánek}$ je průměrný proudový odběr v režimu spánku (7,28 mA) a $t_{celkový_cyklus}$ je celkový čas, který je 60 minut.

$$Avg_I_{cyklus} = \left(\frac{(2 \text{ m} \cdot 208,31 \text{ mA}) + (58 \text{ m} \cdot 7,28 \text{ mA})}{60 \text{ m}} \right) = 13,98 \text{ mA} \quad (5.2)$$

$$t_{výdrž} = \left(\frac{kapacita}{Avg_I_{cyklus}} \right) \quad (5.3)$$

Jelikož byla vypočítána průměrná spotřeba během hodinového cyklu, tak je možné touto hodnotou vydělit kapacitu, a tím dostaneme teoretickou hodnotu výdrže baterie (počet cyklů, resp. počet hodin) při tomto cyklování.

$$t_{výdrž} = \left(\frac{1100 \text{ mAh}}{13,98 \text{ mA}} \right) = 78,68 \text{ h} \quad (5.4)$$

Tato hodnota je však teoretická a v praxi se k této hodnotě prakticky nedostaneme, protože zde není zahrnuto samovybíjení, změna teploty, LoRa vysílání a navíc ochrana vybavuje ještě před úplným vybitím, takže je brána o část kapacity ochuzena. Pokud by to situace vyžadovala, lze kapacitu zvýšit paralelním připojením dalších dvou LiFePO_4 článků, popř. lze tyto malé články vyměnit za větší. Elektronika je navržena i na vyšší kapacitu článků, důležité je zachování chemie baterie a počtu článků v sérii.

Kapitola 6

Návrhy na zlepšení

V této kapitole budou zmíněny možné návrhy a vylepšení současného prototypu komunikační brány. Řešení této práce je prvním prototypem pro projekt řešený na katedře kybernetiky a biomedicínského inženýrství spolu s firmou Microrisc, s.r.o. V průběhu psaní tohoto textu je rozpracován návrh druhého prototypu a některé níže zmíněné vylepšení byly zahrnuty do nového návrhu.

Prvním možným vylepšením do dalšího návrhu komunikační brány je volba jiného ochranného obvodu, který hlídá nízký stav napětí na baterii. V tomto návrhu byla použita ochrana, která vybavuje již při 2,8 V na jednom z článků. Výrobce článků deklaruje, že nejnižší možné napětí na článku je 2 V, nicméně z voltampérhodinových charakteristik vyplývá, že provoz baterie pod 2,5 V nemá smysl, protože je zbývající kapacita minimální. Pokud by byla baterie odpojována již při 2,5 V místo 2,8 V, byla by výsledná kapacita vyšší přibližně o 100 mAh. Tohoto lze docílit použitím ochrany BQ296100.

Druhým možným vylepšením je implementace multiplexoru, pomocí kterého budou přepínány komunikační sběrnice. Toto vylepšení se týká především IQRF modulu, který má omezený počet vstupně/výstupních pinů. Některé piny slouží ke komunikaci i 3 různých sběrnic, nicméně v nynějším návrhu lze v jednom okamžiku provozovat pouze jednu z těchto sběrnic a v případě změny sběrnice je nutné manuální přepojení propojovacích vodičů. Nově vyvíjený IQRF Daemon bude vyžadovat komunikaci pomocí několika sběrnic a proto toto vylepšení je do další verze nutné.

Dalším vylepšením bude doplnění návrhu o SRAM buffer, který bude sloužit dočasnému uložení dat, pokud Daemon nebude ještě připraven a již budou přijímána data z IQRF sítě. Současně bude k IQRF modulu připojena NFC čtečka. Díky těmto dalším rozšířením bude výše zmíněný multiplexor více než nutný. Další technologií, kterou momentální návrh neobsahuje, je technologie WiFi, která bude uživatelsky volitelná. Současný návrh umožňuje připojení USB WiFi adaptéru, popř. ethernetový konektor umožňuje připojení externího access pointu.

Do dalšího prototypu by bylo vhodné lehce přepracovat modul dobíječe tak, aby monitorovací obvod nebyl odpojován od baterie. V případě, že dojde k vybavení některé z ochran, tak je monitorovací obvod odpojen od napájení, a tím je zresetován do výchozího stavu z výroby, tzn.

The diagram illustrates the system architecture with the following components and connections:

- Central Processing Unit (Výpočetní modul):** Contains the **Gateway Daemon** and **IQRF Daemon**.
- External Networks:** Ethernet, LTE, and WiFi are connected to the central unit via bidirectional arrows.
- Power Management:**
 - Modul zdroje** (Power source module) is connected to the central unit and the **Řídicí modul** (Control module).
 - Solární panel** (Solar panel) is connected to the **Modul dobíječe** (Charging module).
 - LiFePO4 baterie** (LiFePO4 battery) is connected to the **Modul dobíječe** via a bidirectional arrow.
- Control and Communication:**
 - Řídicí modul** (Control module) is connected to the **IQRF koordinátor** (IQRF coordinator) via I2C.
 - FRAM** (Ferroelectric Random Access Memory) is connected to the **Řídicí modul** via SPI.
 - SRAM buffer** is connected to the **IQRF koordinátor** via SPI.
 - LoRa modul** is connected to the **Řídicí modul** via UART1.
 - NFC** is connected to the **IQRF koordinátor** via I2C.
- Internal Communication:**
 - UART0** connects the **Gateway Daemon** and **IQRF Daemon** to the **Řídicí modul**.
 - UART** and **SPI** connect the **Gateway Daemon** and **IQRF Daemon** to the **IQRF koordinátor**.

Po odladění všech částí komunikační brány budou navržené moduly implementovány na základní desku, především se jedná o modul dobíječe a modul zdroje. Modulární zůstanou pouze komunikační moduly (LTE, LoRa, WiFi), jejichž volba bude na koncovém uživateli. Dále bude upuštěno od volby řídicího modulu a LoRa modulu od firmy Hardwario a řídicí činnost bude vykonávat 32bitový mikrokontrolér STM32, který bude spolu s LoRa čipem umístěn na základní desce. Místo momentálně využívané SDK knihovny od Hardwario bude implementován operační systém reálného času

a s největší pravděpodobností se bude jednat o FreeRTOS.

Kapitola 7

Závěr

Cílem diplomové práce bylo navrhnout a zrealizovat první prototyp modulární IQRF komunikační brány s ohledem na co nejnížší možnou spotřebu elektrické energie. Návrh vyžadoval vhodný výběr komponentů pro celkovou realizaci a vzhledem k požadavkům na funkcionality bylo nutné některé části navrhnout.

Všechny hardwarové komponenty jsou připojeny k základní desce, která jednotlivé moduly propojuje a doplňuje návrh o další potřebné součástky, které nejsou součástí modulů. Hlavním komunikačním kanálem je LTE nebo Ethernet a jako záložní komunikační kanál byla zvolena síť LoRaWAN. K ovládání napájení jednotlivých modulů bylo využito řídicího modulu od firmy Hardwario, který zajišťuje komunikaci s výpočetním modulem a monitorovacím obvodem. K tomuto modulu byl připojen pinově kompatibilní Hardwario LoRa modul, který slouží k připojení brány do sítě LoRaWAN. Jádrem komunikační brány je výpočetní modul NanoPi Neo Core 2, na kterém je nainstalován operační systém Armbian a na kterém je spuštěn Gateway Daemon. Sběr dat z IQRF sítě nebyl součástí této práce, o tuto funkcionality se stará Gateway Daemon, který vyvíjí firma Microrisc, s.r.o. Připojení komunikační brány do LTE sítě obstarává modul, který se k základní desce připojuje pomocí standardizovaného mPCIe konektoru. IQRF transceiver zastává roli koordinátora IQMESH sítě a k základní desce je připojen pomocí klasického SIM konektoru. Důležitou částí je navržený modul dobíječe, který se stará o dobíjení dvou bateriových článků zapojených do série. Součástí tohoto modulu jsou ochranné obvody, které hlídají zkrat, vybití, rozbalancování a přebíjení. Provoz baterie je sledován monitorovacím obvodem, který na základě měření napětí, proudu a teploty odhaduje aktuální stav baterie. O správné napájení všech dílčích částí se starají dva DC/DC měniče. Všechny zvolené obvody a moduly byly voleny s ohledem na co nejnížší vlastní spotřebu elektrické energie.

Firmware pro řídicí modul byl vytvořen za pomoci Hardwario SDK knihovny. Rovněž i softwarová část byla navržena s ohledem na co nejnížší možnou spotřebu elektrické energie a to tak, že pokud nebylo nutné provádět důležité operace, tak byl řídicí modul v režimu spánku a na mikrokontroléru byly provozovány pouze RTC. O celkový chod se stará scheduler, který plánuje spuštění

úloh. Komunikační brána je ve větší části provozu v režimu spánku a probouzí se na základě volání plánovače, který spouští jednu ze dvou smyček. První smyčka probíhá častěji a obstarává zjištění stavu baterie a LoRa vysílání. Druhá smyčka uvádí celou komunikační bránu do provozu a je spouštěna méně často. Do firmwaru byla zakomponována možnost změnit některé parametry určující chod brány bezdrátově. Všechny zprávy z komunikační brány jsou uloženy na cloudu Českých radiokomunikací a jsou dostupné přes jejich webové rozhraní. Z tohoto rozhraní lze s bránou zpětně komunikovat pomocí zpráv. Struktura zprávy je volitelná a množství posílaných dat v jedné zprávě je možné rozšířit až na maximální velikost LoRa zprávy.

V rámci měření průměrné spotřeby zařízení bylo zjištěno, že největší podíl na spotřebě má provoz výpočetního modulu, který musí být spuštěn více než minutu, aby došlo ke správnému fungování všech služeb. Z měření dále vyplynulo, že vysílání v rámci LTE a LoRa technologie má minimální vliv na celkovou spotřebu zařízení. Průměrná spotřeba v testovacím provozním režimu byla 91,20 mA, kde byla komunikační brána 3 minuty v režimu spánku, 2 minuty v klasickém energeticky nejnáročnějším provozu a dále každé 2 minuty vysílala zprávu pomocí technologie LoRa. Teoretickým výpočtem bylo odhadnuto, že při probouzení brány jednou za hodinu by byla výdrž baterie přibližně 78 hodin.

Všechny části komunikační brány byly odzkoušeny a výsledný prototyp je funkční. Výsledek této práce je jednou z částí projektu řešeného katedrou kybernetiky a biomedicínského inženýrství společně s firmou Microrisc, s.r.o. Vyvinutý prototyp obsahuje základní funkcionalitu komunikační brány a je stavebním kamenem pro vývoj druhého prototypu.

Literatura

1. *Úvod do IoT sítí* [online] [cit. 2020-11-13]. Dostupné z: <https://www.iotport.cz/iot-novinky/lorawan/lorawan-sigfox-nebo-nb-iot-srovnani-3-vyznamnych-typu-iot-siti>.
2. *Jak se vyznat v záplavě sítí pro internet věcí* [online] [cit. 2020-11-14]. Dostupné z: <https://www.zooco.io/blog/jak-se-vyznat-v-zaplave-siti-pro-internet-veci/>.
3. *Sítě pro internet věcí v České republice* [online] [cit. 2020-11-14]. Dostupné z: <https://elektro.tzb-info.cz/informacni-a-telekomunikacni-technologie/16519-site-pro-internet-veci-v-ceske-republice>.
4. DADOK, Tomáš. *Návrh a realizace monitorovacího systému stability stavebních konstrukcí na platformě technologií IoT. Ostrava, 2020. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechnika a informatiky, Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství.* [Online] [cit. 2020-11-15]. Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/140476/DAD0013_FEI_N2649_2612T041_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
5. *Rychlá implementace technologie LoRaWAN* [online] [cit. 2020-12-12]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/rychla-implementace-technologie-lorawan.html>.
6. *Lora technology* [online] [cit. 2020-12-12]. Dostupné z: https://www.osel.cz/8732-lora-technology.html?typ=odpoved&id_prispevku=142574.
7. *Sigfox Česká republika* [online] [cit. 2020-12-01]. Dostupné z: <https://sigfox.cz>.
8. *SIGFOX - princip, struktura, protokol, použití* [online] [cit. 2020-12-01]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/sigfox-princip-struktura-protokol-pouziti.html>.
9. *NarrowBand IoT* [online] [cit. 2020-12-19]. Dostupné z: <https://www.iot-portal.cz/2016/04/30/narrowband-iot/>.
10. *Bezdrátová inovace pro malá data jménem IQRf* [online] [cit. 2020-12-19]. Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/bezdratova-inovace-pro-mala-data-jmenem-iqrf/>.
11. *What is IQRf?* [Online] [cit. 2020-12-19]. Dostupné z: <https://www.iqrf.org/what-is-iqrf>.

12. *IQRf* [online] [cit. 2020-12-19]. Dostupné z: <https://www.iot-portal.cz/2017/11/27/iqrf/>.
13. *PCB Layout Considerations for Non-Isolated Switching Power Supplies* [online] [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/an136f.pdf>.
14. *BQ24650 Stand-Alone Synchronous Buck Battery Charge Controller for Solar Power With Maximum Power Point Tracking* [online] [cit. 2020-09-05]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/ds/slusa75b/slusa75b.pdf?ts=1615990684777&ref_url=https%5C%253A%5C%252F%5C%252Fwww.google.com%5C%252F.
15. *bq24650EVM Synchronous, Switch-Mode, Battery Charge Controller for Solar Power* [online] [cit. 2020-09-07]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/ug/slue444a/slue444a.pdf?ts=1615990835452&ref_url=https%5C%253A%5C%252F%5C%252Fwww.google.com%5C%252F.
16. *Technical specification, GB-LFP1865-11 Rechargeable Battery* [online] [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: https://files.gwl.eu/inc/_doc/attach/StoItem/4963/GB-LFP1865-11_specification.pdf.
17. *JAK NA LiFePO₄ BATERIE, TECHNICKÝ PRŮVODCE V 7 KROCÍCH* [online] [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: https://files.gwl.eu/inc/_doc/LFP_Guide_CZ.pdf.
18. *BQ296xxx Overvoltage Protection for 2-Series, 3-Series, and 4-Series Cell Li-Ion Batteries with Regulated Output Supply* [online] [cit. 2020-09-10]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq2961.pdf?ts=1615940259478>.
19. *INA300 Overcurrent-Protection, Current-Sense Comparator* [online] [cit. 2020-09-10]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/ds/sbos613b/sbos613b.pdf?ts=1615984573120&ref_url=https%5C%253A%5C%252F%5C%252Fwww.google.com%5C%252F.
20. *HLADÍK, Jan. MONITOROVACÍ A OCHRANNÝ SYSTÉM BATERIÍ. Brno, 2018* [online] [cit. 2020-09-10]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=170985.
21. *BQ29209-Q1 Voltage Protection with Automatic Cell Balance for 2-Series Cell Li-Ion Batteries* [online] [cit. 2020-09-10]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq29209-q1.pdf?ts=1615755742555&ref_url=https%5C%253A%5C%252F%5C%252Fwww.ti.com%5C%252Fproduct%5C%252FBQ29209-Q1%5C%253FHQS%5C%253DTI-null-null-octopart-df-pf-null-wwe.
22. *MAX17261, 5.1 μ A Multi-Cell Fuel Gauge with ModelGauge m5 EZ* [online] [cit. 2020-09-10]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX17261.pdf>.

23. *MAX17261G/MAX17261X Evaluates: MAX17261 Evaluation Kits* [online] [cit. 2020-09-10]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX17261GEVKIT-MAX17261XEVKIT.pdf>.
24. *MAX1726x ModelGauge m5 EZ, User Guide* [online] [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: <https://pdfserv.maximintegrated.com/en/an/MAX1726x-ModelGauge-m5-EZ-user-guide.pdf>.
25. *RPM-3.0* [online] [cit. 2020-12-15]. Dostupné z: <https://recom-power.com/pdf/Innoline/RPM-3.0.pdf>.
26. *About Core Module* [online] [cit. 2020-02-18]. Dostupné z: <https://tower.hardwario.com/en/latest/hardware/about-core-module/>.
27. *Hardwario Core Modul, Schematics* [online] [cit. 2020-12-15]. Dostupné z: <https://github.com/hardwario/bc-hardware/tree/master/out/bc-module-core>.
28. *Hardwario Firmware SDK* [online] [cit. 2021-02-18]. Dostupné z: <https://sdk.hardwario.com/>.
29. *MAX1726x Software Implementation Guide* [online] [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: <https://pdfserv.maximintegrated.com/en/an/MAX1726x-Software-Implementation-user-guide.pdf>.

Příloha A

Seznam příloh

Součástí práce jsou přílohy v elektronické podobě.

- Firmware – firmware řídicího modulu.
- Gerber – gerber soubory pro výrobu DPS.
- Obrázky – obrázky schémat a DPS, fotografie.
- Schémata – zdrojové soubory schémat, DPS a vytvořená knihovna součástek.
- Obvody – soubory s popisem pinů obvodů.